

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE DINÁMICA DE LA CONFIGURACIÓN DEL
PAISAJE Y LA RESPUESTA HIDROLÓGICA A ESCALA DE CUENCA EN DOS
CUENCAS FORESTALES DEL SECANO INTERIOR DE LA REGIÓN DEL MAULE.**

BENJAMÍN HERNÁN GASTÓN RUPERTO SOTOMAYOR GONZÁLEZ

SANTIAGO, CHILE

2017

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE DINÁMICA DE LA CONFIGURACIÓN DEL PAISAJE Y LA RESPUESTA HIDROLÓGICA A ESCALA DE CUENCA EN DOS CUENCAS FORESTALES DEL SECANO INTERIOR DE LA REGIÓN DEL MAULE.

ANALYSING RELATIONSHIPS BETWEEN LANDSCAPE CONFIGURATIONAL CHANGES AND HYDROLOGICAL RESPONSE AT SUBCATCHMENT SCALE IN TWO TEMPERATE FOREST BASINS IN MAULE'S INNER DRYLAND.

BENJAMÍN HERNÁN GASTÓN RUPERTO SOTOMAYOR GONZÁLEZ

SANTIAGO, CHILE

2017

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

**ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE LA DINÁMICA DE LA CONFIGURACIÓN
DEL PAISAJE Y LA RESPUESTA HIDROLÓGICA A ESCALA DE CUENCA EN DOS
CUENCAS FORESTALES DEL SECANO INTERIOR DE LA REGIÓN DEL MAULE.**

**Memoria para optar al Título Profesional de
Ingeniero en Recursos Naturales Renovables**

BENJAMÍN HERNÁN GASTÓN RUPERTO SOTOMAYOR GONZÁLEZ

PROFESOR GUÍA

Calificaciones

Sr. Mauricio Galleguillos Torres

Ingeniero Agrónomo, M.S., Dr.

PROFESORES EVALUADORES

Sr. Luís Morales Salinas,

Profesor de Ciencias Naturales y Física, M.S., Dr.

Sr. Juan Manuel Uribe Meneses

Ingeniero Agrónomo

SANTIAGO, CHILE

2017

*Hincho mi corazón para que entre,
Como cascada ardiente el universo.
El nuevo día llega y su llegada
me deja sin aliento.
Canto como la gruta que es colmada,
Canto a mi día nuevo.
Amanecer (Gabriela Mistral)*

*Y sé que lo ven,
Lo lindo que está.
¡Que la vida cambia al cantar!
Al cantar – Pájaro*

Le dedico esta memoria a todo el mundo y a quien la quiera leer

AGRADECIMIENTOS

Esta memoria es el resultado de 5+3 años de universidad en la que he conocido y compartido, amigado, viajado y peleado con mucha gente. En la U, en las salas de clases, en los carretes, en la casa, en los cerros y allá por las lejanías del desierto florido y la Patagonia. No es solo la memoria, es todo un ciclo que partió en 2009 y termina con estas letras. Me faltarían hojas para recordar y reconocer todo lo vivido en este tiempo, pero vamos a hacerle el intento.

Conocí el amor, el odio, el deporte, el esfuerzo, las diferencias y los encuentros. Todo un mundo nuevo y un nuevo mundo. Definitivamente entré Uno y salí Otro. Y me siento bien con eso. ¡Gracias!

El Club de Rugby Antumapu (CRA), gran parte de mi vida universitaria, les deseo lo mejor y digo: ¡Muchas gracias! A mis compañeros del CEIREN en 2013: Anne, Barbi, Max, Rana, derribando las murallas de la apatía con trabajo y acción. ¡Gracias!

A los Gallechicos. Nos conocimos y crecimos en el trabajo, como dijera Víctor, allá por las lejanías de Cauquenes en 2015. Cris, Lely, Denisse, Andrés, y más tarde Iván y Hambers. Compañeros de trabajo que nos hicimos amigos, les agradezco la compañía, el apañe, los días de calor en terreno y las siestas a la orilla del camino, las preguntas respondidas y preguntadas, las tardes en el laboratorio y los carretes en el Volantín y todo lo demás. Mención especial a Andrés por la enorme voluntad de ayudar en las preguntas complejas de métodos y en la identificación de especies en terreno.

A los Leccitos. Gran grupo de gente (de los cuales varios se repiten del párrafo anterior) que pude llegar a conocer y amistar en el inmortal Laboratorio de Ecología de Ecosistemas. Carla y Ariel, Jevu, Sole, Ivan, Hambers, Cris, Denisse. ¡Qué rico haberlos conocido y que genial poder seguir compartiendo con ustedes! Muchas gracias por recibirme en tu laboratorio Jorge, es un muy buen lugar para trabajar y espero en el futuro trabajar con gente así en un lugar así.

A mi profesor, Mauricio Galleguillos y el CR(2). Gracias por el apañe, la buena disposición al trabajo y las conversaciones, la ayuda y la pega. Han sido dos años y medio desde julio de 2014 cuando comenzamos a conversar para armar algo interesante en lo que trabajar, y aquí estoy en 2017, terminándolo. ¡Muchas gracias!

A mi generación 2009. Compartimos 5 años de nuestra vida casi todos los días, en las buenas y en las malas. Es increíble lo rápido que pasa el tiempo y como hemos crecido: trabajos, matrimonios, casas, viajes, hasta guagas. Quiero decirles que, aunque a veces fue más rudo que otra cosa, la convivencia con Ustedes me formó mucho y me hizo crecer como persona. Caleta. Esos carretes de generación (distorsionados), el paseo del ombligo, de loh peshoh, el de ConCon (no recuerdo como le pusimos), el viaje a Contulmo, las salidas a Pantanillos, el

trabajo de OT (¡aguante los PROT y el tren solar!). Sin importar como partimos, sé que terminamos con mucho Amor. ¡Muchas gracias!

A Klaus y Matías. Son lo más grande cabros. Los quiero mucho y les agradezco en el alma la amistad y el apañe. Esas vueltas en la 216 a la casa conversando, los carretes detrás de los centros de estudiantes, la fonda de Derecho, Gómez Millas, ese carretazo épico en la casa de la Clau en 2014. Las oncesitas con marraqueta en la casa de Matías con su familia, el “no hagan ruido para no molestar a mi abuela” de Klaus. El parkour rural en Pequeño Paine. El mochileo a Argentina en 2012 con Klaus (creo) y el destacable y la celebrable retomación de la amistad. Las cervezas compartidas en mi terraza cuando el pudú venía de Chiloé (cómo olvidar la cera), los taca-taca, las idas a la Blondie y picar huevo y la notable capacidad de Klaus de enamorarse al tiro (y que le funcione más encima).

A ti, Gaby, quiero agradecerte toda la compañía, la comprensión, el apoyo y el amor que compartimos. Enormemente. Muchas Gracias.

A mi familia. Mi mamá, Rosario, mi papá, Pablo, mi hermano Nicolás y mi hermana Macarena. Y todos mis primos, primas y tíos y tías y abuelas. Todo este tiempo me apañaron caleta. En la U, cuando estaba triste, cuando llegaba a las 12 de la noche, o si llegaba cansado de entrenar. Agradezco abundante y enormemente la preocupación, el apañe, las preguntas con interés, aunque no entendieran nada de lo que les explicaba y la compañía. Las tardes ricas disfrutadas en la casa y los fines de semana en Melipilla. Y al Can. Lo más probable es que nunca supo que estuviera haciendo esta memoria, sin embargo, fue de las que más presente estuvo en mi trabajo, literalmente. Un corazón para todos nosotros. Lo más pequeño y lo más grande, muchas gracias, Can torpe.

A ese hermoso grupo de gente que son Lo'Cabros y las Fajas. Quiero agradecerles públicamente porque con ustedes he aprendido un mundo sobre el trabajo, y más importante aún, sobre el Amor. Y eso es lo más grande.

En la tónica de los grupos de gentes bacanes, quiero agradecer a la Vecindad. Puro Amor, puro cariño y puro apañe. Han sido de las cosas más lindas que me ha pasado este año que se nos fue y estoy inmensamente feliz por todos los vinos, las canciones, los partes y las comidas, el yoga, las series y toda la buena onda que compartimos. ¡Que siga por siempre!

Pío Pío. Quiero reconocer que desde que conozco al Buen Panchito Martínez (allá por 2015) él ya venía escuchando que estoy “terminando la memoria”. Pues bien, 2017 y el joven figura en Buenos Aires estudiando bandoneón y yo aquí, agradeciendo. Cosas que pasan. Lo más grande Pájaro. Chiquillos, la música y el arte son los más lindo, es el complemento perfecto para cuando las palabras se quedan cortas y el mundo está recién pintado. Nico, Rolo, Jose, Felipe y Panchito, los quiero caleta y he disfrutado cada vez que subimos (o bajamos) al escenario. Enorme compañía, increíble complemento. ¡Muchas gracias!

A todo el mundo, los que se me olvidan y los que no, enormes y abundantes muchas muchas gracias. De verdad. Godoy.

CONTENIDO

Resumen.....	1
Abstract	2
Introducción y Objetivos.....	3
Objetivo general.....	5
Objetivos específicos.....	5
Materiales y Métodos.....	6
ÁREA DE ESTUDIO.....	6
MATERIALES.....	7
Datos espaciales.....	7
Información meteorológica y fluviométrica	8
Software.....	9
MÉTODO.....	9
Objetivo específico nº1: Determinar y caracterizar la variabilidad espacio-temporal de los elementos constitutivos del paisaje.....	9
Pre-procesamiento de la información espacial:	11
Objetivo específico nº2: Evaluar la relación existente entre la respuesta hidrológica de la cuenca y los elementos del paisaje.....	18
Análisis estadístico	19
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	20
Exactitud global de las clasificaciones (OA) y separabilidad espectral de clases.....	20
Composición del Paisaje	20
Periodo 1986–2000.....	22
Periodo 2000-2014.....	22
Caracterización Estructural del paisaje	25
Ubicación en el paisaje según Geoformas.	25
Índices de Estructura de Paisaje.....	30
Análisis general	31
Caracterización de la respuesta hidrológica a escala de cuenca.....	32
Situación general en el área de estudio.....	32
Coeficientes de Escorrentía	33

Relaciones entre variables de paisaje y Coeficiente de Escorrentía.....	36
Efectos de la composición a nivel de posición en el paisaje sobre el coeficiente de escorrentía.....	36
Efectos de la Fragmentación del paisaje sobre el coeficiente de Escorrentía.....	38
Efectos de la vegetación asociada a cursos de agua sobre el coeficiente de escorrentía	40
Análisis de la temporalidad de los resultados.....	42
Conclusiones	43
Bibliografía	45
ANEXOS	51
Anexo 1. Ubicación, código DGA y tipo de información para estaciones utilizadas en el estudio (proyección UTM huso 18, Datum WGS84).....	51
Anexo 2.a. Índices de estructura de paisaje utilizados (McGarical et al., 2012)	52
Anexo 2.b. Valores de los índices de estructura de paisaje en la cuenca de Cauquenes, para las 8 fechas del periodo 2000-2014 (valores adimensionales).	55
Anexo 2.c. Valores de los índices de estructura de paisaje en la cuenca de Purapel, para las 8 fechas del periodo 2000-2014 (valores adimensionales).	55
Anexo 3.a Cobertura de suelo en Cauquenes temporada 1985-86.....	56
Anexo 3.b Cobertura de suelo en Cauquenes temporada 2000-01.....	57
Anexo 3.b Cobertura de suelo en Cauquenes temporada 2001-02.....	58
Anexo 3.c Cobertura de suelo en Cauquenes temporada 2004-05.....	59
Anexo 3.d Cobertura de suelo en Cauquenes temporada 2005-06.....	60
Anexo 3.e Cobertura de suelo en Cauquenes temporada 2006-07.....	61
Anexo 3.f Cobertura de suelo en Cauquenes temporada 2008-09	62
Anexo 3.g Cobertura de suelo en Cauquenes temporada 2010-11.....	63
Anexo 3.h Cobertura de suelo en Cauquenes temporada 2013-14.....	64
Anexo 3.i Cobertura de suelo en Purapel temporada 1985-86.....	65
Anexo 3.j Cobertura de suelo en Purapel temporada 2000-01	66
Anexo 3.k Cobertura de suelo en Purapel temporada 2001-02.....	67
Anexo 3.l Cobertura de suelo en Purapel temporada 2004-05.....	68
Anexo 3.m Cobertura de suelo en Purapel temporada 2005-06.....	69
Anexo 3.n Cobertura de suelo en Purapel temporada 2008-09	70

Anexo 3.o Cobertura de suelo en Purapel temporada 2010-11	71
Anexo 3.q Cobertura de suelo en Purapel temporada 2013-14	72
Anexo 4.a. Separabilidad espectral de clases entre los pares Bosque Nativo – Pino (B-P), Bosque Nativo – Eucaliptus (B-Eu) y Pino-Eucaliptus (P-Eu) en Cauquenes y Purapel, para la temporada 1985-86 y el periodo 2000-01 a 2013-14.	73
Anexo 4.b. Exactitudes del productor (PA) y usuario (UA) para las clases Pino, Eucaliptus, Bosque Nativo y Matorrales en la Cuenca de Cauquenes desde 1985-86, 2000-01 a 2013-14.	74
Anexo 4.c. Exactitudes del productor (PA) y usuario (UA) para las clases Pino, Eucaliptus, Bosque Nativo y Matorrales en la Cuenca de Purapel desde 1985-86, 2000-01 a 2013-14.	74
Anexo 5.a. Composición general del paisaje en el periodo 2000-2014 en la cuenca de Cauquenes (expresado en ha)	75
Anexo 5.b. Composición general del paisaje en el periodo 2000-2014 en la cuenca de Cauquenes (expresado en porcentaje de la superficie total de la cuenca).....	75
Anexo 5.c. Composición general del paisaje en el periodo 2000-2014 en la cuenca de Purapel (expresado en ha)	76
Anexo 5.d. Composición general del paisaje en el periodo 2000-2014 en la cuenca de Purapel (expresado en porcentaje de la superficie total de la cuenca)	76
Anexo 6.a Geformas del paisaje en la cuenca de Cauquenes.....	77
Anexo 6.b. Geformas del paisaje en la cuenca de Purapel.....	78
Anexo 6.c. Superficie de clase de cobertura de suelo según ubicación en el paisaje (geformas del paisaje) en la cuenca de Cauquenes en periodo 2000-2014 (expresado en porcentaje de la superficie total de la cuenca).....	79
Anexo 6.d. Superficie de clase de cobertura de suelo según ubicación en el paisaje (geformas del paisaje) en la cuenca de Purapel en periodo 2000-2014 (expresado en porcentaje de la superficie total de la cuenca).....	80
Anexo 7.a. Buffers de vegetación asociado a cauces en la cuenca de Cauquenes	81
Anexo 7.b. Buffers de vegetación asociado a cauces en la cuenca de Purapel	82
Anexo 7.c. Superficie por cobertura de suelo en fajas de 30m asociadas a cursos de agua en la cuenca de Cauquenes (expresado en ha).....	83
Anexo 7.d. Superficie por cobertura de suelo en fajas de 30m asociadas a cursos de agua en la cuenca de Cauquenes (porcentaje de la superficie total de la faja)	83
Anexo 7.e. Superficie por cobertura de suelo en fajas de 30m asociadas a cursos de agua en la cuenca de Purapel (expresado en ha).....	84

Anexo 7.f. Superficie por cobertura de suelo en fajas de 30m asociadas a cursos de agua en la cuenca de Purapel (pocentaje de la superficie total de la faja)	84
Anexo 8.a. Mediana del índice Topographic Wetness Index (TWI) por clase de cobertura dentro del paisaje en la cuenca de Cauquenes, en el periodo 2000-2014.	85
Anexo 8.b. Mediana del índice Topographic Wetness Index (TWI) por clase de cobertura dentro del paisaje en la cuenca de Cauquenes, en el periodo 2000-2014.	85
Anexo 9. Coeficientes de Escorrentía anual para las cuencas de Cauquenes y Purapel en el periodo 2000-2014.	86
Anexo 9a. Coeficientes de Escorrentía anual y estacional para la cuenca de Cauquenes en el periodo 20001-01 a 2013-14	86
Anexo 9b. Coeficientes de Escorrentía anual y estacional para la cuenca de Purapel en el periodo 20001-01 a 2013-14	87
Anexo 10. Correlaciones entre variables del paisaje y coeficientes de escorrentía a escala anual y estacional en el periodo 2000-2014	88

RESUMEN

Los sistemas forestales, naturales y antrópicos, tienen un rol central en la generación de servicios ecosistémicos de, entre otros, provisión de agua y regulación del ciclo hidrológico. Sin embargo, este se ve afectado por la degradación y pérdida de los bosques en una cuenca. La expansión de la industria forestal y la pérdida de bosque nativo en la zona central de Chile desde mediados de la década de 1970 se ha relacionado con la disminución en la cosecha de agua a largo plazo, sin embargo, hasta ahora los análisis solo se han realizado considerando la composición del paisaje, obviando la configuración del mismo. Esta zona se identifica como un paisaje antrópico dominado por una matriz de plantaciones industriales de especies de rápido crecimiento (*Pinus radiata* D. Don y *Eucalyptus* spp.) y parches aislados de renovales de vegetación nativa, matorrales, cultivos de secano y suelo desnudo, el cual muestra una intensa dinámica espacial y estructural interior definida por las cortas rotaciones forestales (10 a 20 años). El objetivo de la presente memoria es evaluar la existencia de relaciones entre la respuesta hidrológica y los cambios en la composición, configuración y estructura del paisaje a escala de cuenca en dos cuencas del secano interior de la región del Maule. Para ello se utilizaron escenas satelitales *Landsat* y un Modelo Digital de Elevación de la misión SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) para generar 8 mapas de cobertura de suelo entre las temporadas de verano 2000-01 y 2013-14. Se calcularon indicadores de configuración y estructura del paisaje para representar la dinámica interna de las cuencas y se calcularon métricas de fragmentación, identificándose además las coberturas cercanas a cursos de agua para analizar posibles efectos del flujo del agua por diferentes ecosistemas. Se utilizó un test de correlación de Spearman para analizar las relaciones existentes entre las variables de paisaje y la cosecha de agua, representada por el coeficiente de escorrentía calculado a escala anual y estacional. Los mapas de cobertura de suelo alcanzaron una precisión global entre 85% y 95%, las clases más abundantes fueron Plantación Forestal y Matorral en ambas cuencas. La superficie de Bosque Nativo es escasa y está altamente dispersa en el paisaje, no representado más del 8% de la superficie total en promedio en ambas cuencas. La composición general del paisaje presentó coeficientes de variación del orden del 10-20% por clase, pero no se observaron cambios bruscos o estadísticamente significativos en ninguna clase, catalogándose el paisaje dentro de una avanzada etapa de intervención y antropización. La superficie de Plantaciones en pendientes en Cauquenes mostró una correlación negativa con el CE anual y de otoño, mientras que la Complejidad de forma de parche tendió a correlacionarse positivamente con el CE a varias escalas temporales. Los resultados indican que, aunque no exista una tendencia de cambio fuerte dentro de la composición de un paisaje, la variabilidad interna, gatillada por el forestal industrial podría estar generando un efecto significativo en el ciclo hidrológico a corto plazo. Es necesario seguir investigando este fenómeno en ecosistemas en constante evolución y cambio para mejorar nuestra capacidad de adaptación en escenarios de creciente escasez del recurso hídrico.

ABSTRACT

Forest ecosystems, natural and human-made, play a key role in the generation of water-related ecosystem services, but this functionality is affected by forest degradation and forest loss. The expansion of industrial forestry and the loss of native forest in central Chile since the mid 70's has been related with the decrease in water yield in the long-term but, until now, analysis has been focused only on landscape composition, not considering landscape configuration. The study area is identified as an anthropic landscape dominated by a matrix of fast-growing industrial plantations (*Pinus radiata* and *Eucalyptus spp.*) and scattered patches of degraded second-growth native forests and shrubland, dryland crops and bare soil, which has an intense inner spatial and structural dynamic triggered by short rotations applied to plantations (10 to 20 years). The main goal of this research is to evaluate the existence of relations between the hydrological response and changes in landscape composition, configuration and structure in two catchments in the Maule inner dryland region. For this, Landsat imagery and a Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) Digital Elevation Model (DEM) were used to generate landcover maps for 8 summer seasons between 2000-01 and 2013-14. Various configuration and landscape structure indices were calculated to represent the catchment's inner spatial dynamics as well as landscape fragmentation and structure metrics, also identifying the composition in riversides buffers at 30 and 60m from the stream to analyze the effects of riverside vegetation on hydrological response. A Spearman's correlation test was used to test for the existence of significant correlations between landscape features and the water yield, represented with the runoff coefficient estimated at annual and seasonal scale. Landcover maps overall accuracies (OA) varied from 85% to 95%, being the most abundant covers Industrial Plantations and Shrubland in both catchments. Native forests are highly scattered and represents a minor proportion of the landscape, covering an average of 8% of the total surface in the study period in both study sites. The landscape's general composition showed variations of 10-20% per cover class, but no abrupt changes were observed at class level, cataloging the landscape into a severe stage of intervention and anthropization. There were statistically significant correlations detected between hydrological response and landscape configuration features in both catchments, with different behaviors at annual and seasonal scales. The amount of Industrial Plantations on hillsides in Cauquenes showed a negative correlation with the runoff coefficient at annual and seasonal (autumn) scale, while patch shape complexity tended to show a positive correlation with the runoff coefficient at various temporal scales. Results show that, even when there is no significant or abrupt changes in landscape composition, the inner configurational dynamic triggered by the forestry management measures may generate a significant effect on hydrological cycle even at short term. It is mandatory to continue investigating highly dynamic ecosystems to enhance our comprehension and resilience in the context of growing water scarcity.

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La conjunción local de ecosistemas y usos de suelo que se replica en el terreno puede identificarse como paisaje, el cual, si se aumenta la escala de observación puede identificarse como un elemento constituyente de una región. En ambos casos los paisajes se consideran mosaicos de terreno, los cuales están compuestos por sus elementos constituyentes (Forman, 1995); la manera en que se ordenan en el espacio se considera la estructura del paisaje.

La actividad humana, desde la conversión de paisajes naturales a antrópicos o incluso el cambio en el manejo aplicado a sistemas productivos, ha transformado gran parte de la superficie terrestre (Foley et al., 2005). Este proceso se conoce como cambio de cobertura de suelo, y es considerada uno de los motores más importantes en la dinámica de los ecosistemas y paisajes forestales (Uddin et al., 2015).

La expansión de la industria maderera y forestal ha sido uno de los modeladores más poderosos del paisaje en la zona central de Chile en la segunda mitad del siglo XX, especialmente en la cordillera de la costa (Armesto et al., 2007). Investigaciones llevadas a cabo en esta zona dan cuenta del explosivo aumento de la superficie de plantaciones industriales de pino y eucalipto desde mediados de la década de 1970 al presente, junto con la progresiva desaparición de la vegetación nativa y la creciente fragmentación y aislamiento de los remanentes (Pizarro, 2006; Echeverría et al., 2006, Little et al., 2009; Altamirano y Lara, 2010).

Actualmente, la cordillera de la costa de la región del Maule es un paisaje dominado por una matriz de monocultivos de pino radiata y eucalipto. Se caracteriza por presentar una alta dinámica espacial interna impulsada por el corto periodo de rotación con que se manejan las plantaciones forestales industriales, 10 a 20 años según especie y objetivo de plantación (Gerding, 1991), aun cuando las superficies globales de cada cobertura de suelo se mantienen relativamente estables en el tiempo.

Los ecosistemas naturales y antrópicos son generadores de variados servicios ecosistémicos, entendidos como beneficios directos e indirectos derivados de sus funciones y procesos, y que son aprovechados por la sociedad (Millenium Ecosystem Assesment, 2005); uno de los más importantes para los sistemas humanos y naturales es el abastecimiento de agua y la regulación del ciclo hidrológico (Millenium Ecosystem Assesment, 2005). Analizando el efecto que el cambio de cobertura de suelo puede tener sobre las propiedades hidrológicas de un ecosistema, Foley et al. (2005) señalan que el uso del suelo puede afectar el balance hídrico superficial y la transformación de la precipitación en escorrentía superficial, subsuperficial y evapotranspiración.

Lara et al. (2009), Little et al. (2009) y Garmendia et al. (2012) coinciden en que el aumento de plantaciones forestales de pino radiata tiene un efecto negativo sobre los caudales generados en temporada seca, a su vez que el aumento de la vegetación nativa tiene un efecto que va desde neutra a positivo en los caudales en igual fecha. Por otro lado, se reconoce que la fragmentación constituye una de las causas de pérdida de biodiversidad más serias a escala global, con el consecuente efecto en la estructura y funcionalidad de los ecosistemas a nivel local (Echeverría et al., 2007; Carranza et al., 2015).

Para analizar estos efectos derivados del cambio de la cobertura del suelo es necesario considerar los tres principales modeladores del flujo de agua en el paisaje: topografía, suelo y vegetación. La topografía, entendida como la forma general del terreno y sus atributos medibles (pendiente, exposición, altura, entre otros) determina la dirección de flujo del agua y está fuertemente relacionado con las condiciones locales de suelo y vegetación (Liang y Uchida, 2014; Ceballos et al., 2015); el suelo influye directamente sobre el flujo de agua a través del paisaje ya que es el medio por el que este se genera, además de determinar la importancia de los diferentes elementos de la escorrentía (superficial, subsuperficial, entre otros) a través de la compactación, tasa de infiltración y de percolación (Lana-Renault et al., 2011); y por último, la vegetación controla directamente la interceptación de la precipitación, tasa de evapotranspiración y regula la escorrentía superficial (Conacher y Sala, 1998; Millenium Ecosystem Assesment, 2005; Lana-Renault et al., 2011).

Los cambios de cobertura de suelo vienen aparejados a modificaciones de estos atributos. La pérdida de la cubierta vegetal asociado a estos está generalmente relacionada a procesos erosivos y el deterioro en la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, debido a la disminución en la tasa de infiltración y la regulación de la escorrentía (Conacher y Sala, 1998; Millenium Ecosystem Aseessment, 2003). Así también, la fragmentación del paisaje puede afectar la continuidad del flujo de agua a lo largo del paisaje en el caso de la instalación de coberturas más o menos permeables al paso de esta en la pendiente.

En un paisaje con una estructura altamente variable producto de los continuos cambios de uso de suelo asociados a la industria forestal local, se plantea que los cambios de la configuración espacial de los elementos constituyentes del paisaje (parches) pueden afectar la respuesta hidrológica de la cuenca, entendida como la producción de agua en un determinado periodo de tiempo.

OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de la presente investigación corresponde a analizar los efectos del cambio en la estructura y composición del paisaje en la respuesta hidrológica a escala de cuenca en dos cuencas del secano interior de la región del Maule.

Objetivos específicos

1. Determinar y caracterizar la variabilidad espacio-temporal de los elementos constitutivos del paisaje
2. Evaluar la relación existente entre la respuesta hidrológica de la cuenca y los elementos del paisaje.

MATERIALES Y MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio se ubica en el secano costero interior de la región del Maule, parcialmente dentro del área definida como “Río Maule – Cobquecura” por Echeverría et al. (2006), y corresponde a las cuencas Naciente de Purapel, provincia de Talca, y Naciente de Cauquenes, provincia de Cauquenes (Figura 1). Presenta un clima templado con una precipitación anual que varía entre los 835 mm en la cuenca de Cauquenes y los 717 mm en la de Purapel, concentrada en los meses de abril a octubre (Little et al., 2009).

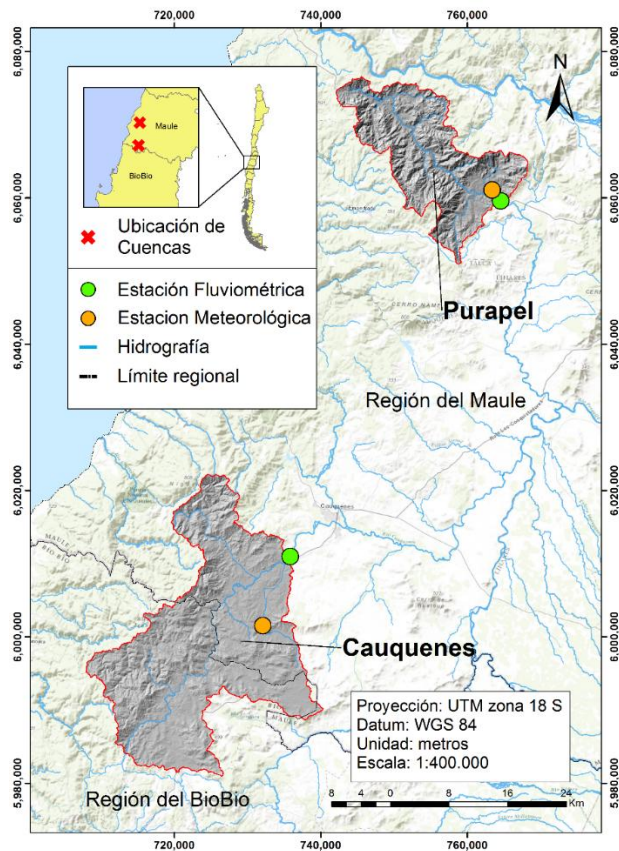


Figura 1. Ubicación relativa de las áreas de estudio. En gris se demarcan las cuencas de Purapel (zona norte) y la cuenca de Cauquenes (Zona sur).

La cuenca de Cauquenes se extiende sobre 61.914 ha, registra un caudal medio mensual de 26,9 m³/s y presenta un régimen hidrológico pluvial (Little et al., 2009). Por su parte, la cuenca de Purapel tiene una superficie de 27.135 ha, caudal medio mensual de 28,37 m³/s e igual régimen hidrológico (Pizarro et al., 2006).

Según Luebert y Pliscoff (2006) la vegetación natural de la zona de estudio corresponde a las formaciones de bosque caducifolio mediterráneo costero de *Nothofagus glauca* y *Persea lingue*, Bosque caducifolio mediterráneo costero de *Nothofagus glauca* y *Azara petiolaris*, Bosque espinoso mediterráneo interior de *Acacia caven* y *Lithraea caustica* y Bosque espinoso mediterráneo interior de *Acacia caven* y *Peumus boldus*. Sin embargo, este tipo de vegetación se remite a parches dispersos y crecientemente fragmentados inmersos en una matriz dominante de plantaciones industriales de *Pinus radiata* y *Eucalyptus spp.*, las que han experimentado un explosivo aumento desde mediados de la década de 1970 (Pizarro, 2006; Echeverría et al., 2006, Little et al., 2009; Altamirano y Lara, 2010).

Dentro de las áreas de estudio se identifican dos macroformas del paisaje: la cordillera de la costa, que representa la mayor proporción de las cuencas al Oeste, y el piedemont de la cordillera de la costa en las partes bajas hacia el Este. En esta zona la cordillera de la costa está compuesta principalmente por rocas graníticas y metamórficas de edad paleozoica. El relieve es suave y ondulado, de formas bajas y amesetadas, con alturas máximas de aproximadamente 700 msnm en las cercanías de Purapel. Los suelos más representativos de la zona son las series Cauquenes, Constitución, Treguaco y Ninhue (Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile (SERNAGEOMIN), 2003).

El piedemonte está compuesto por rellenos aluvionales procedentes de quebradas de la cordillera de la costa y depósitos fluviales de los ríos que bajan desde la cordillera andina (SERNAGEOMIN, 2003).

MATERIALES

Datos espaciales

Para la caracterización espacial del paisaje se utilizaron imágenes satelitales de los sensores “Thematic Mapper” 5 (TM5), “Enhanced Thematic Mapper Plus” (ETM+) y “Operational Land Imager” (OLI) a bordo de las plataformas Landsat 5, 7 y 8, respectivamente, y pertenecientes al catálogo “Landsat Climate Data Record” (CDR). Las escenas cuentan con una resolución espacial de 30 m, radiométrica de 8 bits (TM y ETM+) y 12 bits (OLI) (United States Geological Survey (USGS), 2015) y un periodo de revisita de 16 días. En total se

utilizaron 13 escenas Landsat para mapear las temporadas de verano de 1985-86, 2000-01, 2001-02, 2004-05, 2005-06, 2006-07, 2008-09, 2010-11 y 2013-14 (Cuadro 1).

Para la delimitación de las cuencas en estudio y la caracterización topográfica del paisaje se utilizó un modelo digital de elevación (DEM, por sus siglas en inglés) de la misión SRTM (“Shuttle Radar Topographic Mission”) (Cuadro 1), el cual cuenta con una resolución espacial de 30 m y un error vertical de 16 m (Jordan et al, 1996).

Cuadro 1. Datos satelitales utilizados

Sensor	Código de la escena	Fecha de obtención
TM 5	LT50010851986035XXX03	4/2/1986
ETM+	LE7001085001052AGS00	21/2/2001
ETM+	LE70010852001228EDC00	16/8/2001
ETM+	LE70010852002055EDC00	24/2/2002
ETM+	LE70010852002183EDC00	2/7/2002
TM 5	LT50010852005007COA00	7/1/2005
TM 5	LT50010852005135COA01	15/5/2005
TM 5	LT50010852005234COA00	22/8/2006
TM 5	LT50010852007029COA01	29/1/2007
TM 5	LT50010852010261COA01	18/9/2010
TM 5	LT50010852011008COA01	8/1/2011
OLI	LC80010852014032LGN00	1/2/2014
OLI	LC80010852014224LGN00	12/8/2014
SRTM	S36_w073_1arc_v3	11/2/2000
SRTM	S37_w073_1arc_v3	11/2/2000

Todos estos productos fueron descargados gratuitamente y están disponibles a través del portal *Earth Explorer* del *United States Geological Survey* (USGS) de EEUU (USGS, 2017).

Información meteorológica y fluviométrica

Para caracterizar la respuesta hidrológica a nivel de cuenca se utilizó información de las estaciones fluviométricas Río Cauquenes en el Arrayán (Cauquenes) y Río Purapel en Nirivilo (Purapel), definidas como los puntos de descarga de las respectivas cuencas. En el

caso de la información pluviométrica, se utilizó información de las estaciones El Álamo (Cauquenes) y Nirivilo (Purapel). Todas estas estaciones son dependientes de la Dirección General de Aguas (DGA) y su información fue obtenida a partir de la base de datos generada por Little et al. (2009), a excepción de la estación pluviométrica El Álamo, cuya información fue obtenida de la Base de Datos de Variables Observacionales disponible en el sitio web del Centro de Ciencia del Clima y de la Resiliencia (CR(2), 2017).

La información pluviométrica de la base de datos de Little et al. (2009) se obtuvo en términos de escorrentía acumulada mensual [mm] y se encuentra validada hasta 2004, existiendo algunos vacíos de información e inconsistencias que fue necesario rellenar en el periodo 2005-2014. Para tales fines se utilizó información proveniente de las estaciones Río Purapel en Sauzal y Río Cauquenes en Desembocadura, dependientes de la DGA y ubicadas aguas abajo de ambas cuencas. La información fue obtenida en la Base de Datos de Variables Observacionales del CR2. El detalle de las estaciones utilizadas se presenta en el anexo 1.

Software

El procesamiento y análisis de la información espacial se realizó con los softwares ENVI 5.1, IDL 8.3, SAGA GIS 2.2.6, ArcMap 10.1 y Fragstats 4.2.1. El procesamiento de la información pluviométrica se realizó en Microsoft Excel 2015 y el análisis estadístico en R project version 3.2.5.

MÉTODO

Objetivo específico n°1: Determinar y caracterizar la variabilidad espacio-temporal de los elementos constitutivos del paisaje

La estructura del paisaje está definida por los patrones espaciales de dos componentes: Composición y configuración. La primera representa el aspecto no espacial del paisaje y, en ese sentido, qué y cuánto hay en el área de estudio, mientras la segunda aborda el carácter espacial, el arreglo y contexto de los componentes del paisaje.

Para representar el arreglo del paisaje se realizaron mapas de cobertura de suelo de las áreas de estudio en temporada de verano (enero y febrero) para ocho fechas comprendidas entre

2001 y 2014, que representaron el arreglo del paisaje para el año hidrológico en curso. Estos son los años hidrológicos 2000-01, 2001-02, 2004-05, 2005-06, 2006-07, 2008-09, 2010-11 y 2013-14. Se definió un intervalo de tiempo de entre 1 a 3 años para reflejar detalladamente la variabilidad del paisaje en el lapso de tiempo estudiado. Para tener un punto de referencia y establecer el grado de degradación del paisaje en el tiempo se generó como referencia en términos de composición un mapa de cobertura de suelo para la temporada 1985-86.

Se definieron 6 clases de cobertura de suelo basándose en investigaciones anteriores realizadas en el área por personal del CR2 en 2014 (datos no publicados). Se entiende el término de “cobertura de suelo” desde un acercamiento científico, esto es, haciendo referencia a los tipos de vegetación y construcciones humanas en el territorio y es “lo que puede encontrarse” en términos biofísicos en el área de estudio (Coffey, 2013). Las clases de cobertura de suelo definidas para el área de estudio se presentan en el Cuadro 3 y la Figura 2:

Cuadro 3. Definición de clases de coberturas definidas para la zona de estudio

Cobertura	Sigla	Descripción
Agro-praderas	AP	Zonas cultivadas y praderas naturales y antrópicas;
Bosque Nativo	B	Formaciones de bosque maulino dominado por especies del género <i>Nothofagus</i>
Matorral	M	Zonas de vegetación dispersa con un máximo de cobertura de copa del 75% y presencia de suelo desnudo o ligeramente cubierto.
Plantaciones Industriales	P	Monocultivos adultos de <i>Pinus radiata</i> y <i>Eucalyptus spp</i>
Sin Vegetación	SV	Zonas de suelo desnudo y talas rasas
Urbano	U	Ciudades, pueblos e instalaciones industriales importantes.

Para asegurar una clasificación fiable fue necesario eliminar distorsiones de la señal percibida por el sensor, por lo que se pre-procesó la información satelital asociadas a efectos topográficos.



Figura 2. Clases de cobertura de suelo

Pre-procesamiento de la información espacial:

Corrección radiométrica y atmosférica. El producto Landsat Surface Reflectance High level Data del catálogo Climate Data Record (Landsat CDR) viene corregido radiométrica y atmosféricamente por el NASA Goddard Space Flight Center (GSFC), por lo que no fue necesario aplicar procedimientos adicionales.

Corrección topográfica. Según Hantson y Chuvieco (2010), la normalización topográfica es una parte fundamental del pre-procesamiento al momento de trabajar con series temporales de imágenes satelitales ya que las sombras del terreno cambian con el tiempo y la hora de captura de la imagen.

Para eliminar los efectos de la topografía sobre las escenas satelitales se utilizó el método de C-Correction, propuesto por Teillet et al. (1982) y automatizado en código para ENVI 5.1 por Canty (2014). Para considerar las diferencias en la reflectividad entre las diferentes coberturas de terreno al calcular el factor C se separó el terreno en dos clases (con vegetación / sin vegetación) en función de un valor arbitrario de NDVI (Hantson y Chuvieco, 2010). En la presente investigación se utilizó un valor umbral de 0,4. Así mismo, para simular la topografía del terreno se utilizó el MDE.

Corrección geométrica. En la presente investigación no fue necesario aplicar dichos procedimientos ya que las escenas utilizadas presentan el nivel más alto de corrección geométrica (L1T) para productos Landsat.

Generación de los mapas de cobertura de suelo. Se realizaron clasificaciones supervisadas utilizando el método de clasificación de Máxima Verosimilitud o *Maximum Likelihood Classifier* (MLC) con un umbral de probabilidad de 95%. Este método de clasificación supervisada es el más ampliamente utilizado en percepción remota debido a su relativa simpleza y robustez (Gao y Zhang, 2009), y considera que los valores de los píxeles de cada clase presentan un comportamiento estadístico normal. Así, determina la probabilidad de que un píxel se encuentre dentro de cada tipo de cobertura al comparar su comportamiento espectral con información de referencia de una muestra conocida, asignándose finalmente a la clase más probable (Chuvienco, 2008). Para reducir la presencia de píxeles aislados se aplicó un filtro modal con una matriz de 5x5.

Como información de entrada para el clasificador se utilizaron las 6 bandas correspondientes al espectro visible, infrarrojo cercano y medio de Landsat (bandas 1-5 + 7 de los sensores TM5 y ETM+ y 2-7 del sensor OLI). La separabilidad espectral de las clases se evaluó con la distancia de Jeffries-Matusita (JM) (Padma y Sanjeevi 2014).

Para mejorar la separabilidad espectral entre bosque nativo y plantaciones se incluyó información auxiliar al clasificador a través de tres índices espectrales que tienen relación con el comportamiento fenológico de la vegetación: una escena del *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) (Rouse et al., 1974) en temporada de verano (ecuación 1), una del *Green NDVI* (Gitelson et al., 1998) de verano (ecuación 2) y una escena de diferencia invierno-verano de NDVI (Δ NDVI, ecuación 3).

El uso del NDVI se incluyó para incorporar información del vigor de la vegetación, el uso del GNDVI por su relación con la discriminación de copias densas, como son las plantaciones de pino, mientras la diferencia de NDVI invierno-verano (Δ NDVI) se incluyó debido a su uso en la caracterización del estado fenológico de las plantas al ver los cambios del vigor en el tiempo, asociado a la pérdida de follaje en invierno (Le Maire et al. 2014, Jia et al. 2014, Verbesselt et al. 2010a, 2010b).

$$(1) NDVI_v = \frac{IRC - Rojo}{IRC + Rojo}$$

$$(2) GNDVI_v = \frac{NIR - Green}{NIR + Green}$$

$$(3) \Delta NDVI_{i-v} = NDVI_{inv} - NDVI_v$$

Donde $NDVI_v$ = Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (“Normalized Difference Vegetation Index” en inglés) en verano

$NDVI_{inv}$ = Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (“Normalized Difference Vegetation Index” en inglés) en invierno

$GNDVI_v$ = Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde (“Green Normalized Difference Vegetation Index” en inglés)

IRC_v = Banda de Infrarrojo Cercano (0,76 – 0,90 μm)

$Rojo_v$ = Banda Roja (0,6 – 0,7 μm)

$Verde_v$ = Banda Verde (0,52 – 0,6 μm)

La definición de las firmas espectrales de cada clase de cobertura se realizó a partir de la escena de la temporada 2013-14 utilizando polígonos de entrenamiento definidos a partir de información de terreno de una campaña realizada en febrero de 2014 y campañas en verano (2) y primavera (1) de 2015. Estos fueron digitalizados en ENVI 5.1 y verificados con imágenes de alta resolución de Google Earth (Jia et al., 2014), procedimiento que se repitió para todas las fechas hacia el pasado cuando hubo información de alta resolución disponible (2004-05 a 2013-14).

Cuando no hubo imágenes de alta resolución disponibles (1985-86, 2000-01, 2001-02) se digitalizó los polígonos de entrenamiento a través de fotointerpretación de las escenas Landsat ocupando diferentes composiciones de bandas y criterio experto para discriminar diferentes coberturas, y corroboración de la firma espectral ya definida utilizando la herramienta *Z profile spectrum*. La utilización de varias composiciones de bandas se hizo para destacar diferencias diferentes atributos de cada clase de cobertura (Horning, 2004), como la pérdida de follaje en invierno en bosques de *Nothofagus* con respecto a plantaciones industriales (destacado en rojo en composición 5- Δ NDVI-2, Figura 3.B) y la mayor reflectividad en el infrarrojo del suelo desnudo con respecto a zonas vegetadas (destacado en tonos de violeta en la composición 7-4-2, Figura 3.C).

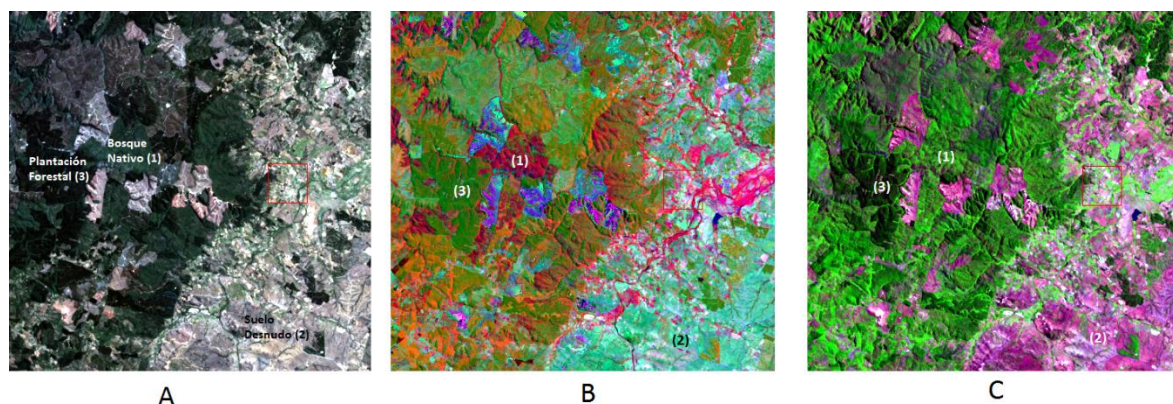


Figura 3. Diferencias en colores de clases de cobertura para composición en color real (rojo-verde-azul, A), composición caducifolia (SWIR 1- Δ NDVI-verde, B) y falso color 7-4-2 (SWIR 2-IRC-verde, C) en las cercanías de Cauquenes en 2014.

Se digitalizó un ideal de 30 polígonos de entrenamiento por clase, de 3x3 píxeles de tamaño (900 m² de superficie), buscando representar fielmente las condiciones de cada cobertura dentro de las áreas de estudio.

Validación de los mapas de cobertura de suelo. La validación de las clasificaciones generadas se realizó con el método de la Matriz de Confusión, que sirve para analizar las coincidencias y errores entre la clasificación generada y la cobertura real del área de estudio (Chuvieco, 2008). Para representar la realidad de sitio se utilizó 1/3 de los polígonos de entrenamiento generados en el paso anterior como polígonos de validación.

Análisis de la Composición del paisaje. Como se señaló anteriormente, la Composición del paisaje se definió según el porcentaje de la cuenca cubierto por la clase, expresado en porcentaje (ecuación 4).

$$(4) C_i = \frac{A_i}{A_t}$$

Donde C_i = Porcentaje de la cuenca cubierto por la clase i (%)

A_i = Superficie cubierta por la clase i (m²)

A_t = Superficie total de la cuenca (m²)

Para reflejar el proceso de cambio de cobertura de suelo en términos de la composición del paisaje se calculó la tasa anual de cambio (r , ecuación 5) siguiendo el modelo del interés compuesto propuesto por Puyravaud (2003) y que ha sido extensamente utilizada en estudios de cambio de cobertura de suelo en Chile (Echeverría et al. 2006; Zamorano-Elgueta et al. 2015; Miranda et al. 2015; Hernández et al. 2016)

$$(5) r_i = \frac{1}{t_2 - t_1} \times \ln \frac{A_2}{A_1}$$

Donde r_i = tasa de cambio anual de la clase i (% / tiempo)

t_1 = año inicial

t_2 = año final

A_1 = proporción de la cuenca cubierto por clase i en año 1

A_2 = proporción de la cuenca cubierto por clase i en año 2

Análisis de la Configuración del Paisaje. Entendiendo que las características topográficas del paisaje son el principal modelador de la respuesta hidrológica en el terreno, se caracterizaron los componentes del paisaje (coberturas de suelo) en términos de sus características topográficas para de esta manera asociar las características físicas del terreno a la clase de cobertura presente en un sitio.

Para esto se utilizaron varios índices topográficos con el fin de reflejar directa e indirectamente la posición en términos generales de las coberturas de suelo en el paisaje. En específico, se realizó una clasificación de geoformas del paisaje según Weiss (2001) utilizando el Índice de Posición Topográfica o “Topographic Position Index” (TPI por sus siglas en inglés), se calculó el Índice de Humedad Topográfica o “Topographic Wetness Index” (TWI, por sus siglas en inglés) y se identificó los tipos de cobertura asociados a los cauces de agua.

Clasificación de Geoformas del paisaje. Las geoformas del paisaje se entienden como atributos geomorfológicos de la superficie terrestre que se desarrollan a gran y pequeña escala, muy importantes en procesos bióticos y abióticos a escala de paisaje (Błaszczynski, 1997). Al considerar las geoformas del paisaje como variable topográfica se pretende analizar explícitamente los efectos de la posición en el paisaje sobre la respuesta hidrológica, bajo el supuesto de que las condiciones topográficas generales (pendiente, curvatura, *etc.*) en toda la geoforma son constantes.

La delimitación de las geoformas se realizó de acuerdo a Weiss (2001), utilizando el algoritmo automatizado en el software SAGA GIS 2.1.6. Este considera el MDE como variable de entrada y se basa en dos cálculos del TPI, que se define como la diferencia entre la altitud en un punto y el promedio de elevación de una vecindad definida (ecuación 6), para

definir la pertenencia a una u otra geoforma. Se utilizan dos vecindades, una pequeña y otra grande, para reflejar mejor la existencia de geoformas anidadas (Figura 4); siendo estas vecindades definidas en función del tamaño y extensión de la cuenca y su relieve. El producto final corresponde a una clasificación de 10 geoformas del paisaje.

$$(6) TPI = h_{local} - h_{media_{vecindario}}$$

Donde $TPI =$ Topographic Position Index

$h_{local} =$ altura en punto de referencia (m)

$h_{media_{vecindario}} =$ promedio de altura de vecindad (m)

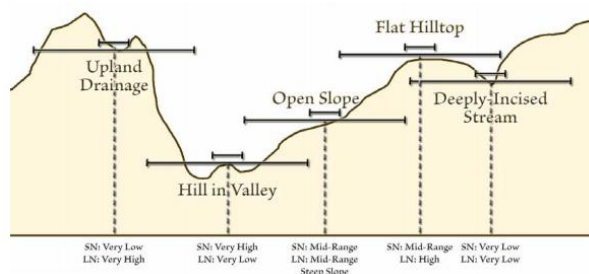


Figura 4. Método para clasificación de geoformas según Weiss (2001).

Finalmente se cruzó la clasificación de geoformas con la de cobertura de suelo para obtener la superficie total de cada cobertura en cada geoforma. De esta forma se generaron vectores para cada cobertura de suelo con los valores de cada superficie por geoforma.

Potencial de humedad: Topographic Wetness Index (TWI). Se utilizó el Índice de Humedad Topográfica o “Topographic Wetness Index” (TWI) (Beven y Kirby, 1979) para reflejar de manera indirecta la posición en el paisaje. Este índice se utiliza ampliamente en el estudio de los efectos de la topografía sobre procesos hidrológicos (Sorensen et al., 2006) y corresponde a una relación entre la superficie aportante aguas arriba y la pendiente en el punto de medición (ecuación 7). Los valores más altos se asocian a sectores bajos y fondos de quebradas y cauces de agua, mientras que valores más bajos corresponden a cimas de cerros y cabeceras de cuenca.

$$(7) TWI = \ln \frac{a}{\tan b}$$

Donde $TWI =$ Topographic Wetness Index

$a =$ Superficie contribuyente aguas arriba (ha)

$b =$ pendiente en el punto de estudio

Se extrajo la mediana de los valores de TWI para cada clase de cobertura bajo el supuesto de que a mayor valor de TWI la cobertura tiende a estar ubicada en zonas más bajas de la cuenca.

Vegetación asociada a cursos de agua. La presencia de vegetación nativa en cercanía a cursos de agua ha sido relacionada a efectos benéficos sobre la producción de escorrentía en la zona templada de Chile (Little et al., 2014). De esta manera, se cuantificó la composición del paisaje restringido a las cercanías de cuerpos de agua para analizar la existencia de relaciones significativas a escala de cuenca.

Para esto se delimitó la red hidrográfica de cada cuenca a partir del DEM SRTM, definiendo como condición de ocurrencia de cauce que un píxel tenga una superficie aportante aguas arriba superior a 30 ha debido a que para la zona esa superficie representa un umbral teórico que explica el escurrimiento aguas abajo¹. Luego, se definió fajas de 30 y 60 m de ancho a cada lado de los cauces (vecindades de 1 y 2 píxeles mínimo) para determinar las coberturas asociadas a estas zonas. Se cruzó esta información con las coberturas de suelo y se calculó el porcentaje que cada cobertura representa dentro de la superficie total de cada cuenca (ecuación 8).

$$(8) VC_{ij} = \frac{S_{clase\ ij}}{S_{faja\ j}} \times 100$$

Donde VC_{ij} = Cobertura i en distancia j desde el cauce

$S_{clase\ ij}$ = Superficie de clase i a distancia j desde el cauce (m²)

$S_{faja\ j}$ = Superficie total de la faja de j m desde el cauce (m²)

El resultado final fue un vector con el porcentaje que cada cobertura representa sobre el total de la superficie de la faja para cada año de estudio.

Fragmentación a escala de cuenca. Se computaron una serie de índices de fragmentación y estructura de parches a escala general del paisaje, esto es, calculando un único valor del índice que representa la totalidad del mismo, generalizando y resumiendo la información desde la escala de parche o clase de cobertura de diferentes maneras (McGarical et al., 2012). El detalle de los índices calculados se puede ver en el Cuadro 4, el detalle de cálculos y significados puede verse en el anexo 2.a

Se consideró esta escala de análisis para caracterizar el paisaje de manera general e inclusiva, en la línea de que las perturbaciones ocurridas dentro del paisaje se realizan extensamente y en una variedad de diferentes clases de cobertura. El cómputo de la información se realizó utilizando el software Fragstat 4.2 (McGarical et al., 2012).

¹ Dr. Cristián Little, comunicación personal. 4 de diciembre de 2015.

Cuadro 4. Índices de estructura de parche y fragmentación calculados

Índice	Nombre	Atributo que representa
NP	Número de Parches	Número de parches
AREA_MN	Área media de parche (m ²)	Área media de parche
ENN_MN	Media de la Distancia Euclidiana al vecino más cercano (m)	Agregación de parches
ENN_MD	Mediana de la Distancia Euclidiana al vecino más cercano (m)	Agregación de parches
ENN_CV	Coefficiente de Variación de la Distancia Euclidiana al vecino más cercano (m)	Agregación de Parches
FRAC_MN	Media del Índice de Dimensión Fractal	Complejidad de forma de Parche
FRAC_MD	Mediana del índice de Dimensión Fractal	Complejidad de forma de Parche
FRAC_CV	Coefficiente de Variación del Índice de Dimensión Fractal	Complejidad de forma de Parche
SHAPE	Índice de Forma	Complejidad de forma de Parche

Objetivo específico n°2: Evaluar la relación existente entre la respuesta hidrológica de la cuenca y los elementos del paisaje

Preparación y tratamiento de la estadística fluviométrica y meteorológica. Para la corrección y relleno de la estadística fluviométrica se utilizó el método de las correlaciones fluviométricas entre estaciones, basado en regresiones lineales simples establecidas entre estaciones que presenten un comportamiento hidrológico similar y se encuentren en zonas comparables. Se utilizaron los datos de escorrentía mensual acumulada para el periodo comprendido entre 1980 y 2014.

Se estableció las correlaciones entre las estaciones aguas arriba y aguas abajo en cada cuenca (Cauquenes en Arrayán – Cauquenes en Desembocadura y Purapel en Nirivilo – Purapel en Sauzal) al ser cercanas entre sí y ubicarse en un mismo contexto territorial (secano interior). Sólo se trabajó con las regresiones que mostraran un ajuste lineal de $R^2 > 0,7$; en caso contrario se utilizó la estación de la cuenca vecina para la generación de la regresión. En caso que no se lograra una relación satisfactoria se procedió a modelar la escorrentía a partir de la precipitación acumulada mensual del periodo faltante con datos de la estación meteorológica correspondiente a cada cuenca.

Se realizó un análisis de curvas másicas para verificar la consistencia del registro pluviométrico de la estación pluviométrica El Álamo, utilizándose como estación patrón el promedio de las estaciones Nirivilo y Quella, validadas por Little et al. (2009).

Caracterización de la respuesta hidrológica a escala de cuenca. Para caracterizar la respuesta hidrológica de la cuenca se utilizó el Coeficiente de Escorrentía (C) (ecuación 9) (Little et al., 2009; Lara et al., 2009; Garmendía et al., 2012), definido como la relación entre la escorrentía directa acumulada y la precipitación acumulada a escala anual (Blume et al., 2007). Dada la marcada estacionalidad en la precipitación (aproximadamente 70% ocurre entre abril y junio) se dividió el año en 3 temporadas para analizar posibles diferencias en la respuesta hidrológica a lo largo del año, según lo realizado por Little et al (2009). Las temporadas definidas fueron Verano (diciembre, enero, febrero, marzo), Invierno (abril, mayo, junio, julio) y Primavera (agosto, septiembre, octubre, noviembre).

$$(9) C_i = \frac{Esc_i}{PP_i}$$

Donde C_i = Coeficiente de Escorrentía para el periodo i (año o estación)

Esc_i = Escorrentía acumulada (mm) para el periodo i

PP_i = Precipitación acumulada (mm) para el periodo i

Análisis estadístico

La identificación de posibles relaciones entre los cambios en estructura del paisaje y respuesta hidrológica se realizó a través de un análisis de correlación utilizando el método de Spearman's Rho, con un intervalo de confianza del 95% (Styers et al., 2010).

Se asumió que el arreglo del paisaje representado en cada mapa de cobertura es constante para todo el año hidrológico a representar, por lo que los análisis a escala estacional y anual se realizaron con el mismo set de variables estructurales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan de manera conjunta los resultados y la discusión, de manera de poder destacar en su contexto las singularidades observadas y los resultados novedosos o importantes.

Exactitud global de las clasificaciones (OA) y separabilidad espectral de clases

La exactitud global de las clasificaciones fue de 86% a 100% (Cuadro 4), coincidiendo con otros estudios similares en el tema (Echeverría et al. 2006, 2008; Altamirano y Lara, 2010; Miranda et al., 2015). Estas se pueden ver en el Anexo 3. Se alcanzaron niveles buenos a excelentes de separabilidad espectral entre clases, con valores que van desde JM=1,7 a 2 (anexo 4).

Cuadro 4. Exactitud global de las clasificaciones generadas en todo el periodo de estudio.

Temporada	1985-86	2000-01	2001-02	2004-05	2005-06	2006-07	2008-09	2010-11	2013-14
Purapel	89%	96%	86%	93%	92%	93%	95%	94%	93%
Cauquenes	87%	93%	90%	96%	100%	95%	92%	95%	95%

Composición del Paisaje

El cambio en la estructura y composición del paisaje durante el periodo de 1986 a 2014 tuvo una intensidad variable en términos absolutos, observándose diferente comportamiento en dos periodos definidos: 1986-2000 y 2000-2014 (Figura 5).

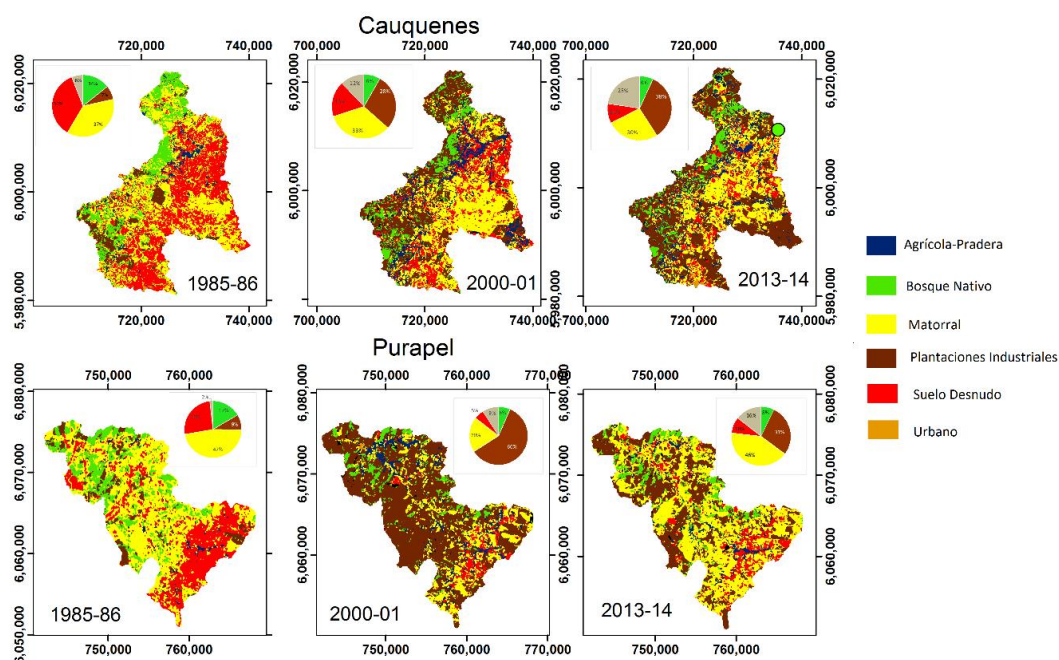


Figura 5. Composición del paisaje en términos generales en las cuencas de Cauquenes y Purapel en 1986, 2001 y 2014.

Cuadro 5. Cambios en composición del paisaje en Cauquenes y Purapel en 1986, 2001 y 2014.

Cuenca	Clase de cobertura	Porcentaje de la superficie de la cuenca			Cambio absoluto			
		1986	2001	2014	2001-2014 (%)	r(86-01)	r(01-14)	r(86-14)
Cauquenes	Bosque Nativo	14%	8%	8%	0%	-3.60%	-0.70%	-4.21%
	Matorral	37%	33%	30%	-10%	-0.70%	-1.00%	-1.49%
	Plantaciones Industriales	7%	28%	38%	26%	9.10%	2.20%	11.00%
	Sin Vegetación	36%	18%	11%	-64%	-4.60%	-3.80%	-7.88%
	Otros	6%	13%	13%	-	-	-	-
Purapel	Bosque Nativo	17%	6%	8%	25%	-6.30%	1.50%	-5.01%
	Matorral	47%	20%	46%	57%	-5.80%	6.50%	-0.19%
	Plantaciones Industriales	9%	60%	31%	-94%	12.80%	-5.10%	8.37%
	Sin Vegetación	26%	5%	10%	50%	-10.50%	4.50%	-6.67%
	Otros	1%	9%	5%	-	-	-	-

Periodo 1986–2000

Este periodo estuvo marcado por altas tasas de establecimiento de Plantaciones Industriales y deforestación de Bosque Nativo en ambas cuencas. En la temporada 1985-86 la matriz dominante del paisaje correspondía a una mezcla de Matorral y Suelo Desnudo, cubriendo un 63% y un 67% del total de la cuenca en Cauquenes y Purapel, respectivamente. Las Plantaciones Industriales representaban un porcentaje menor de cada cuenca, con un 7% en Cauquenes y un 9% en Purapel, mientras que el Bosque Nativo representaba un 14% y 17%, respectivamente (Figura 5, Cuadro 5).

Hacia la temporada 2000-01 se registró un explosivo aumento de la superficie de plantaciones industriales ($\Delta = +461\%$, $r = +10,2\%$ en Cauquenes y $\Delta = +680\%$, $r = +12,8\%$ en Purapel) convirtiéndose en la matriz dominante del paisaje junto con la clase Matorral, lo que se vio acompañado de una fuerte reducción de la superficie de Bosque Nativo en ambas cuencas a casi la mitad de su extensión en 1986 ($\Delta = -43\%$, $r = -3,63\%$ en Cauquenes y $\Delta = -53\%$, $r = -6,29\%$ en Purapel) (Figura 5, Cuadro 5).

Las superficies y porcentajes por clase para cada mapa de cobertura de suelo entre 2000-01 y 2013-14 se pueden ver en el anexo 5.

Periodo 2000-2014

En este periodo se registró una disminución en la intensidad de los cambios composicionales, con tasas de deforestación de bosque nativo de 0,66% en Cauquenes y 1,48% en Purapel, y establecimiento de plantaciones de 2,2% en cada cuenca respectivamente (Figura 5, Cuadro 5). Las clases más variables corresponden a Agro-Praderas y Sin Vegetación, ambas con un Coeficiente de Variación (CV) superior a 30% en ambas cuencas. En Cauquenes la clase más estable correspondió a Plantaciones Industriales (CV=10,5%), seguida por Matorral (CV=11,7%) y Bosque Nativo (CV=17,22%). En Purapel, la clase más estable correspondió a Bosque Nativo (CV =16%), seguido de Plantaciones Industriales (CV=18,3%) y Matorral (CV=22%).

En esta cuenca se observó una disminución constante de la superficie de Plantaciones Industriales en los 14 años de estudio, reduciéndose a la mitad su superficie (Figura 6) . Este comportamiento puede atribuirse a la cosecha de plantaciones adultas y la colonización de estas por arbustos, así como el establecimiento de nuevas plantaciones en su lugar. Estas zonas son erróneamente clasificados como Matorral por su similar estructura y firma

espectral, fenómeno verificado en terreno y a través de imágenes satelitales de alta resolución (Google Earth). Una prueba realizada entre una plantación joven de pino y una zona de matorrales de referencia arrojó una distancia de JM=1,039, resultado atribuible a la limitada resolución espectral de los sensores multi-espectrales de resolución media.

Miranda et al. (2015) describió una alta persistencia del uso forestal en el territorio concepto descrito como equifinalidad dinámica (*dynamic equifinality*) según Patterson y Hoalst-Pullen (2011), coincidiendo con lo visto por CONAF (2011) en relación a la baja tasa de transformación de uso forestal a otros usos en el periodo 1990-2015 en las provincias de Talca y Cauquenes, lo que hace suponer que un cambio de cobertura se deba a la instalación de un nuevo ciclo de cosecha antes que un cambio en el uso de suelo.

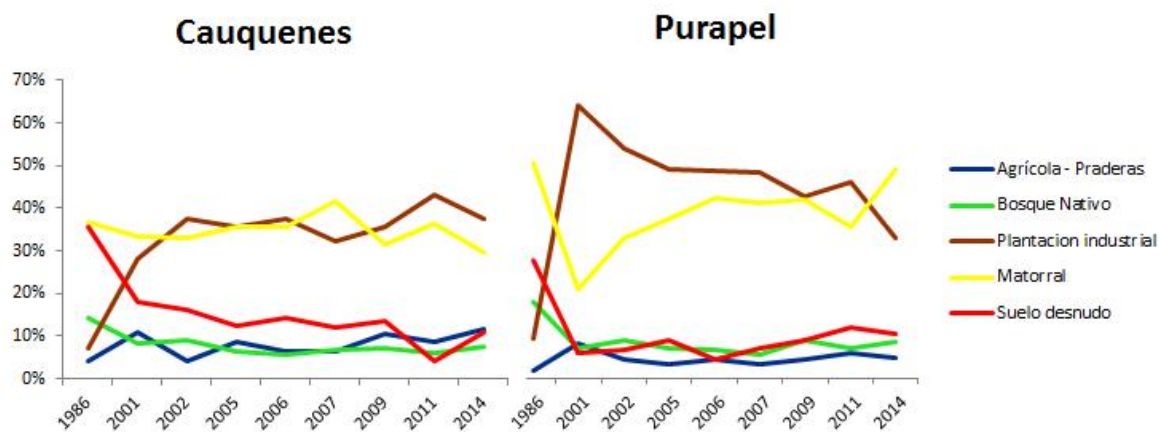


Figura 6. Comportamiento de las superficies de las coberturas de suelo en las cuencas de Cauquenes y Purapel en el periodo 2000-2014.

La dinámica de la composición del paisaje observada coincide con lo descrito para la zona central y sur de Chile por diversos autores (Echeverría et al. 2006; Lara et al. 2009; Altamirano y Lara 2010; Schultz et al. 2010; Miranda et al., 2015) desde mediados de la década de 1970. Esta es caracterizada por un intenso aumento de la superficie de Plantaciones Industriales en la década de 1980 y una continuación en la década de 1990 y 2000, aunque menos intensamente, lo que puede explicarse tanto por el establecimiento de plantaciones en terrenos cubiertos por bosque nativo y cultivos de secano abandonados y matorrales (CONAF, 2011), como por la degradación del bosque nativo debido a la extracción de leña para calefacción y uso humano (Aronson et al. 1998).

Las tasas de deforestación registradas en el periodo 1986-2000 en la presente investigación son de las más altas reportadas para la zona de Chile Central y Sur al comparar con otros estudios de cambio de uso de suelo (Cuadro 6), en particular en la cuenca de Purapel, donde

se observan las tasas de pérdida de bosque nativo más altas registradas. Sin embargo, en el periodo 2000-2014 la intensidad del fenómeno disminuye y las tasas de deforestación son comparables con otras investigaciones, en especial Echeverría et al. (2006) en esta misma zona de estudio quien abarcó el periodo entre 1974 y 2000 con tasas del orden de 4,5%. Considerando el periodo 1986-2014 (Cuadro 5), se ve que la intensidad de pérdida de Bosque Nativo es superior que en zonas tropicales bajo fuerte presión antrópica como el Gran Chaco en Bolivia-Paraguay-Argentina, donde se registró una tasa de deforestación anual de 1,44% anual en el periodo 1972-2007 (Gasparri y Grau 2009).

Cuadro 6. Tasas de pérdida de bosque nativo en la zona centro-sur de Chile entre 1970-2010.

Periodo	Fuente	tasa de deforestación anual (r) (Puyvaraud, 2003)
1990-2000	Altamirano et al. (2013)	0,5
	Echeverría et al. (2012)	0,1
	Echeverría et al. (2012)	0,9
	Echeverría et al. (2012)	0,8
	Altamirano y Lara (2010)	4,1
	Miranda et al. (2015)	2,2
	Miranda et al. (2015)	2,1
	Miranda et al. (2015)	1,1
	Schultz et al. (2010)	0,3
	Echeverría et al. (2006)	3,6
Vergara et al. (2013)	3,8	
Zamorano-Elgueta et al. (2015)	0	
2000-2010	Schultz et al. (2010)	1,5
	Echeverría et al. (2012)	1,7
	Echeverría et al. (2012)	1
	Echeverría et al. (2012)	1,5
	Miranda et al. (2015)	4,8
	Miranda et al. (2015)	3,2
	Miranda et al. (2015)	1,7
	Altamirano et al. (2013)	2,5
	Vergara et al. (2013)	5,8
Zamorano-Elgueta et al. (2015)	0,01	

Fuente: Miranda et al. (2016)

Según Echeverría et al. (2012) evaluando patrones de cambio de cobertura de suelo en ecosistemas temperados del sur de Chile el periodo 1986-2000 puede catalogarse en la Fase II de degradación del paisaje, caracterizada por una pérdida del 65% al 80% de la cobertura boscosa original, altas tasas de deforestación de hasta 1,5%/anual y las tasas más altas de

aforestación con especies exóticas, mientras el periodo 2000-2014 corresponde a la fase III, donde se ha perdido más del 80% del total de la cobertura original boscosa y la intensidad de la deforestación de la cobertura original disminuye con relación a la fase anterior al igual que la tasa de aforestación de especies exóticas, aunque esta última sigue siendo importante. En el área de estudio se considera como cobertura original a los bosques secundarios de *Nothofagus*, debido a la desaparición del bosque primario antes del siglo XIX por la presión antrópica (Aronson et al., 1998; Armesto et al. 2007).

En la fase III, la tasa de deforestación disminuye debido a que ya no hay masas boscosas fácilmente accesibles para su depredación, y el paisaje está principalmente dominado por clases de cobertura de suelo de uso antrópico (Echeverría et al., 2012) que muestra alta persistencia en el territorio (Miranda et al., 2015), en este caso, Plantaciones Industriales y Matorrales antrópicos.

Caracterización Estructural del paisaje

Este estudio corresponde al primer análisis de ubicación en el paisaje en el marco de un proceso intenso de cambio de cobertura de suelo realizado en el país, y poca información existe en este tópico a escala internacional. A continuación, se presentan los resultados del análisis de configuración y estructura del paisaje dentro del periodo 2000-2014 en ambas cuencas.

Ubicación en el paisaje según Geoformas.

Ambas cuencas están dominadas por las geoformas Pendientes Abiertas, Planicies y Pendientes Altas, mientras las demás geoformas no representan una porción significativa de la cuenca (11% en Cauquenes y 3% en Purapel). Por esto se fusionaron las geoformas “Pendientes Altas” y “Pendientes Abiertas” en la geoforma “Pendientes” en función de la escasa superficie de la primera, la similitud en términos topográficos y la adyacencia espacial entre ambas (refleja un continuo creciente dentro de la pendiente). De esta forma se centró el análisis en las siguientes geoformas del paisaje: Planicies y Pendientes (Figura 7). Los mapas de las geoformas pueden verse en el anexo 6.a y 6.b.

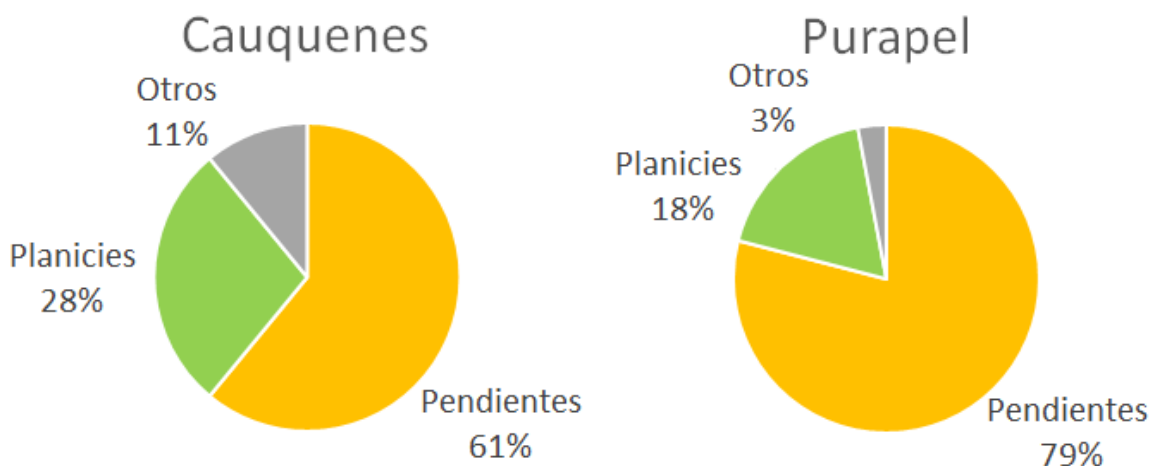


Figura 7. Porcentaje de la superficie total por Geoformas del paisaje en las cuencas de Cauquenes y Purapel

La composición dentro de las geoformas del paisaje está definida fuertemente por la composición general del mismo, lo que se ve en la fuerte correlación entre la superficie total de cada clase de cobertura y la superficie por geoforma del paisaje, excepto en el caso de Bosque en Valles observada en ambas cuencas. La variabilidad registrada en las geoformas se analizó mediante el coeficiente de variación, los que van desde 10% a 26% en Cauquenes y de 16% a 25% en Purapel (Cuadro 7). Las superficies y porcentajes que representa cada cobertura se pueden ver en el anexo 6.c y 6.d.

Cuadro 7. Proporción media de la cuenca cubierta por las coberturas de suelo según ubicación en el paisaje y entre paréntesis el Coeficiente de Variación en el periodo de estudio en Cauquenes y Purapel.

Cuenca	Bosque		Matorral		Pino	
	en pendiente	en plano	en pendiente	en plano	en pendiente	en plano
Cauquenes	4,9% (18,5%)	0,3% (16,3%)	11,6% (10,2%)	6,8% (18,9%)	24,3% (12,4%)	3,3% (18,5%)
Purapel	6,3% (16%)	0,3% (23,2%)	26,4% (24,7%)	11,6% (10,6%)	39,4% (18%)	5,9% (25,7%)

Al analizar el comportamiento de las coberturas en el tiempo se ve que, aunque existe variabilidad dentro de cada clase, no se observa una tendencia marcada en el tiempo, excepto en el caso de la superficie de Plantaciones en Pendientes y Matorrales en Pendientes en Purapel, donde se observa una tendencia negativa de la primera y positiva de la segunda, las que se explican por el comportamiento general de las clases. Así mismo, en Cauquenes se observa una tendencia al aumento en la superficie de Plantaciones en Valles (figuras 8a y

8b), lo que puede asociarse a la expansión de las plantaciones forestales sobre terrenos agrícolas abandonados (CONAF, 2011).

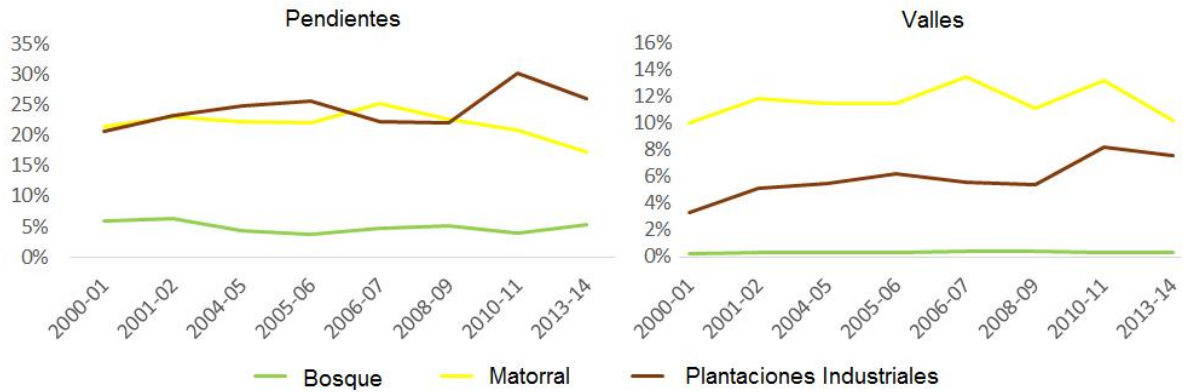


Figura 8a. Porcentaje de la cuenca cubierto por clase de cobertura, según geoforma, entre 2000-01 y 2013-14 en Cauquenes

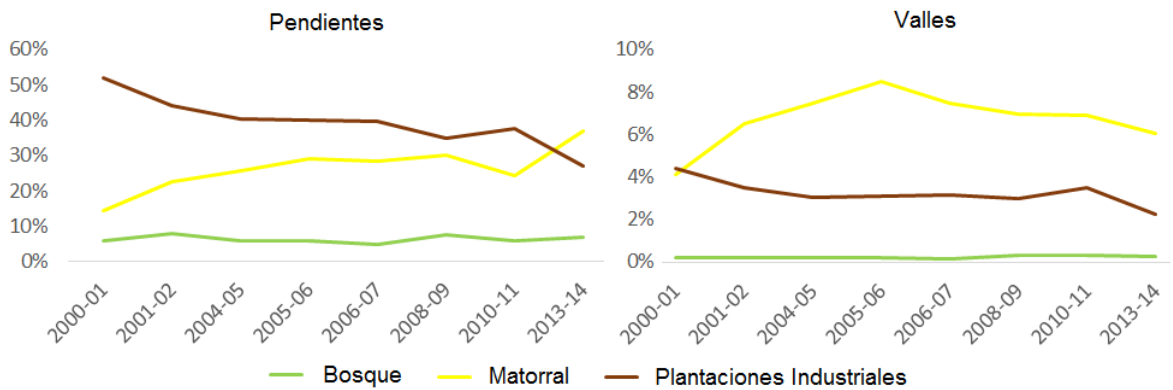


Figura 8b. Porcentaje de la cuenca cubierto por clase de cobertura, según geoforma, entre 2000-01 y 2013-14 en Purapel

Vegetación en Cauces.

Las franjas de 30 y 60 m desde un cauce representan, respectivamente, el 7% y 14% de la superficie total de la cuenca, cubriendo 4.409 y 8.650 ha en Cauquenes y 1.932 y 3.804 ha en Purapel (anexos 7.a, 7.b, 7.c y 7.d).

No se detectaron diferencias significativas en la composición del paisaje comparando según distancia a los cauces, observándose la inexistencia de diferencias significativas entre la

composición a diferentes distancias según un test de Wilcoxon (resultados no mostrados), así como una correlación perfecta aplicando un test de correlación de Spearman., lo que puede ser explicado por la utilización del filtro de mayoría con una matriz de 5x5 en el proceso de clasificación. Al aplicarlo se elimina la presencia de píxeles aislados y se mejora la precisión de las clasificaciones, pero también se generaliza el paisaje y se pierden los atributos más pequeños del terreno. Combinando con la resolución espacial del sensor (30m), se podría deducir que la escala del análisis no es la adecuada para detectar alguna diferencia en la composición de la vegetación en secciones de territorio tan espacialmente acotadas. Sin embargo, como la ley 20.283/2008 de Bosque Nativo del Ministerio de Agricultura declara en el artículo transitorio 8°, literales a) y b), el establecimiento de una faja de protección de vegetación en torno a cauces, permanentes y con un caudal anual mayor a 0,14m³/s, de 25m a cada lado el cauce, para los análisis y presentación de la información se utilizó la composición dentro de la faja de 30m a cada lado del cauce.

Estudios anteriores sobre la caracterización de la vegetación ripariana y sus efectos sobre diferentes atributos del ciclo hidrológico se han realizado en Chile (Lara et al., 2009; Little et al., 2014), sin embargo han utilizado la interpretación de ortofotos para la delimitación de las coberturas, un método que permite mayor nivel de detalle dada la mejor resolución de la imagen y la capacidad de interpretar mejor el terreno, aunque requiriendo mayor nivel de trabajo y la limitación de la aplicación a un área pequeña. La utilización de clasificadores supervisados como el MLC permite generar mapas de cobertura de suelo a mayor escala espacial y con menor trabajo, aunque en la presente investigación los datos de entrada no permiten hacer una diferenciación a la escala requerida.

En esta sección del territorio también se repite el patrón de la composición a escala general del paisaje, siendo las coberturas dominantes Plantaciones Industriales y Matorral en ambas cuencas (Figura 9). La clase Agro-Pradera fue la tercera en importancia en ambos casos, seguida de Bosque y Suelo Desnudo, representando en promedio 11,9% y 8,3% en Cauquenes y 7,1% y 5,2% en Purapel, respectivamente (Cuadro 8).



Figura 9. Porcentaje de superficie de faja de 30m correspondiente a cada cobertura de suelo en las cuencas de Cauquenes y Purapel en el periodo 2000-2014.

Cuadro 8. Media, desviación estándar y Coeficiente de Variación de la superficie de las clases de cobertura en fajas de 30 m desde los cauces de agua.

Cuenca	Cobertura	Media	Coef, de Var,
Cauquenes	AP	20,2%	26,7%
	B	11,9%	10,2%
	M	34,1%	13,8%
	P	23,8%	18,6%
	SV	8,3%	41,7%
Purapel	AP	15,6%	33,1%
	B	7,1%	31,7%
	M	37,0%	24,1%
	P	34,1%	20,1%
	SV	5,2%	45,5%

TWI.

Este indicador mostró los menores niveles de variabilidad en el tiempo, con coeficientes de variación del orden de 0 a 2% por clase. Las zonas de Suelo Desnudo y Matorral, que muestran los niveles más altos en ambas cuencas, tienden a ubicarse en zonas más bajas que las demás clases, mientras el Bosque Nativo, que muestra los menores valores, se ubica en zonas más altas. Esto refleja un mejor grado de conservación en zonas altas y mayor nivel de degradación en zonas bajas, explicado por diferencias en la accesibilidad y la presión de uso histórica (Aronson et al., 1998) (Cuadro 9). Los valores completos pueden verse en el anexo 8.a y 8.b.

Cuadro 9. Media, desviación estándar y coeficiente de variación de la mediana de TWI por cobertura en Cauquenes y Purapel para el periodo 2000-2014.

Cuenca	Cobertura	Mediana promedio	Desviación Estándar	Coeficiente de Variación
Cauquenes	B	9.51	0.13	1,4%
	M	9.98	0.09	0,9%
	P	9.61	0.15	1,6%
	SV	10.09	0.29	2,9%
Purapel	B	9.55	0.06	0,6%
	M	9.70	0.06	0,7%
	P	9.48	0.01	0,1%
	SV	9.87	0.23	2,3%

Índices de Estructura de Paisaje.

Superficie media de parche. La superficie media de los parches del área de estudio tuvo un área promedio entre 10 y 16 ha en ambas cuencas, con una mediana del orden de 0,9 ha y 1,2 ha. Al considerar la superficie media ajustada por área (*area-adjusted mean patch size*) se ve que aumenta al rango entre 2000 ha y 6500 ha en Cauquenes y entre 1000 ha y las 3500 ha en Purapel. La variabilidad observada fue elevada, con Coeficientes de Variación en el rango de 800% a 2000% entre ambas áreas de estudio. Los parches más extensos (*Largest patch Index* o LPI) representaron entre el 17% y 35% de la superficie total en ambas cuencas. No se observaron tendencias temporales en estos atributos.

La diferencia observada entre la media aritmética y la media ponderada por área para los indicadores de complejidad de forma, indica que los parches más grandes presentan formas más complejas que los parches más pequeños, sin embargo, las formas no se alejan mucho de la geometría euclidiana al mostrar valores más cercanos a 1 que a 2.

Aislación. La distancia euclidiana entre parches de igual tipo (índice de aislación) mostró una media de entre 175m y 200m en ambas cuencas, con una mediana entre 108m y 123m y un coeficiente de variación entre 95% y 110%. Al revisar los valores ajustados por área se ve que la distancia euclidiana media disminuye al rango de 80 a 90m en ambas áreas de estudio. No se observó una tendencia definida en este atributo del paisaje.

Complejidad de forma de parche. La media del Índice de Dimensión Fractal (FRAC_MN) se encuentra en torno a 1,05 en Cauquenes y Purapel, mientras que al revisar la media ajustada por área del índice (FRAC_AM), esta oscila en el rango de 1,19 y 1,22 en ambas cuencas. Se registró poca variación dentro de los paisajes, con Coeficientes de Variación (FRAC_CV) del orden de 4 a 4,5%.

La media del Índice de Forma (SHAPE_MN) en ambas cuencas oscila entre 1,32 y 1,35, mientras la media ajustada por área varía entre 6 y 12. El coeficiente de variación varía entre 44% y 50%. Esta diferencia con respecto al índice anterior se explica en el mayor rango de valores de este índice, el cual varía desde 1 (geometría euclidiana) hasta infinito (geometría crecientemente compleja).

A partir de los resultados obtenidos se puede interpretar que el paisaje está compuesto por una mezcla de gran cantidad de parches pequeños y un menor número de parches medianos y grandes, existiendo grandes diferencias en tamaño entre unos y otros. La forma general de los parches en el territorio tiende a presentar formas simples y cercanas a la geometría euclidiana (círculos y cuadrados) a lo largo de todo el rango de tamaños de parche. Por lo demás, el hecho que no se hayan encontrado tendencias estadísticamente significativas en el tiempo indica que la variación temporal observada es parte de la dinámica propia de un paisaje que no ha cambiado de “fase” o etapa.

El detalle de los valores de cada índice puede encontrarse en los anexos 2.b (Cauquenes) y 2.c. (Purapel).

Análisis general

La cobertura más extensa en ambas cuencas corresponde a Plantaciones en Pendientes (P_pend), con una media de 24,3% de la superficie total de la cuenca en Cauquenes y 39,4% en la cuenca de Purapel, seguida por la cobertura Matorral (Cuadro 9), conforme con lo observado en la composición general del paisaje.

En términos de configuración, la cuenca de Purapel muestra mayor variabilidad que la de Cauquenes al mostrar coeficientes de variación sistemáticamente mayores que los de ésta última (Cuadro 9), lo que coincide con la mayor intensidad del cambio de uso de suelo registrada en ésta cuenca en el periodo 1986-2000 y 2000-2014 reflejada en la tasa anual de cambio (Cuadro 5).

Cuadro 9. Media histórica del Porcentaje de Superficie total de la cuenca, y Coeficientes de Variación (entre paréntesis) para los segmentos del paisaje más extensos en Purapel y Cauquenes, en el periodo 2000-2014.

Cuenca	Vegetación en cauces ²			Geoformas		
	Bosque	Matorral	Plantaciones industriales	B en pendiente	M en pendiente	P en Pendiente
Purapel	6,6% (30%)	37,6% (23%)	34,8% (20%)	6,26% (16%)	26,36% (24,7%)	39,4% (18%)
Cauquenes	12,3% (23%)	34,5% (13%)	24,6% (18%)	4,9% (18,5%)	11,6% (10,2%)	24,3% (12,4%)

Se registraron altos niveles de variabilidad interna producto del comportamiento de algunas variables de configuración, sin embargo, los niveles más altos fueron observados en las extensiones de territorio más pequeñas, fenómeno explicado porque cualquier cambio de superficie que ocurra va a ser más importante en términos relativos. Las geoformas y variables estructurales más extensas mostraron menores CV, fluctuando entre 10 y 24,7% (Cuadro 9).

Los resultados derivados del análisis estructural del paisaje indican que este presenta elevados niveles de intervención antrópica, conforme con la fase III de intervención del

² Vegetación en Cauces representa el porcentaje del total de la faja calculada a partir de la red de drenaje definida para cada cuenca.

paisaje (Echeverría et al., 2012) lo que se refleja en la elevada variabilidad de la superficie de parches en cada escenario, alcanzando niveles sobre el 2000% en algunos casos, donde más de la mitad de los parches totales corresponde a parches pequeños (anexo 2).

La permanencia de esta fase durante todo el periodo de estudio se explica por la alta persistencia del uso forestal en el territorio (Miranda et al., 2015) donde se registra un cambio de cobertura en el territorio explicado por las distintas fases del proceso productivo forestal (suelo desnudo → matorral (plantaciones jóvenes) → plantaciones adultas → suelo desnudo), principal motor de la variabilidad de estructura y configuración en el paisaje.

Por último, el hecho que los patrones de la composición del paisaje se repitan a escalas espaciales de menor extensión o más específicas es un reflejo del intenso proceso de homogenización del paisaje producto de la extensa intervención antrópica en los últimos 450 años de ocupación española y chilena, donde la intervención es de tal magnitud que los nichos ecológicos y los microclimas dejan de expresarse en el paisaje producto de la degradación. Aronson et al. (1998) reporta la ausencia de diferencias biológicas a lo largo del paisaje y la virtual desaparición de los ecotonos en el secano interior de Chile Central, componiéndose el paisaje de una matriz de espinales antrópicos degradados, terrenos agrícolas y plantaciones forestales.

Caracterización de la respuesta hidrológica a escala de cuenca

Situación general en el área de estudio

Investigaciones anteriores llevadas a cabo en el área de estudio reportan un comportamiento estrictamente pluvial para las cuencas en estudio, con caudales altamente variables intra e inter anualmente debido a la variabilidad de la precipitación. Sobre el 95% del flujo anual está concentrado en los meses de abril a septiembre (Pizarro et al., 2006; Little et al., 2009).

En el periodo de 1960-2000, Little et al. (2009) describe una tendencia negativa y significativa en los residuos de la regresión escorrentía-precipitación en temporada de verano en ambas cuencas, indicando una disminución en la producción de agua en temporada seca. Estos resultados indican que no solamente la variabilidad de la precipitación está influyendo sobre los caudales, sino que otros factores como el uso del suelo pueden estar influyendo, al estar los caudales de verano más relacionados con la reserva edáfica y el flujo base antes que la precipitación (Pizarro et al., 2006).

Analizando el comportamiento de la escorrentía dentro del periodo de estudio se ve que ambas cuencas no muestran una tendencia estadísticamente significativa ($p > 0.05$), excepto en el caso de la escorrentía de verano en la cuenca de Purapel, en que se ve una tendencia levemente positiva ($m = 0,63$; $p < 0,05$).

Coefficientes de Escorrentía

Los coeficientes de escorrentía a escala anual y estacional pueden verse en el anexo 9 y la Figura 10. Ambas cuencas muestran comportamientos semejantes, con medias anuales de 0,47 y medias estacionales que no muestran diferencias significativas entre sí según el método de Wilcoxon.

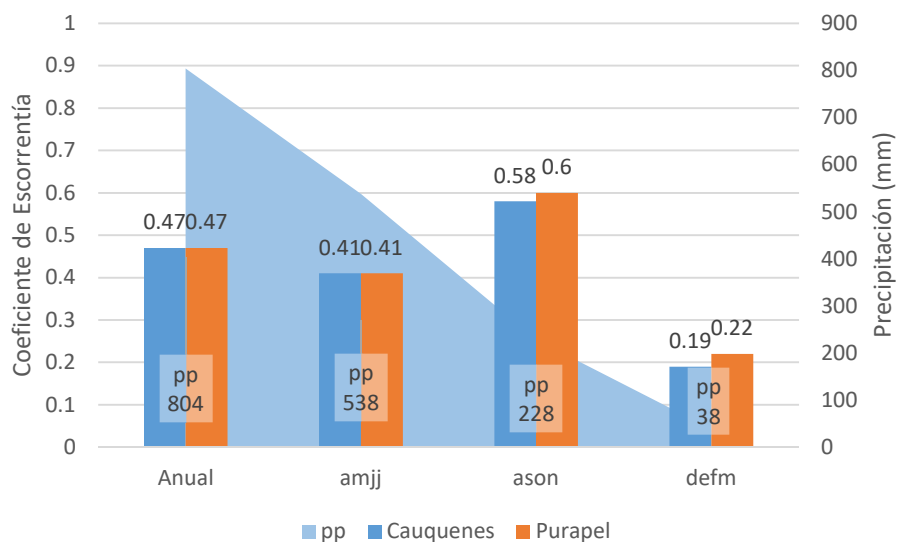


Figura 10. Coeficientes de Escorrentía medios y precipitación acumulada media a escala anual y estacional en las cuencas de Cauquenes y Purapel en el periodo 2000-2014. Las barras representan los coeficientes de escorrentía por cuenca y el área azul representa la precipitación media para el área de estudio.

La estación con el mayor CE corresponde a primavera (ASON), con un $CE_{medio} = 0,61$ en Cauquenes y $CE_{medio} = 0,63$ en Purapel, mientras que el menor CE corresponde al de verano (DEFM), con un $CE_{medio} \approx 0,2$ en ambos casos. Este comportamiento refleja el desfase en la producción de agua en la cuenca al comienzo de la temporada de lluvias, expresándose los máximos CE luego de las mayores lluvias, mientras que en la temporada de verano ya se han agotado la mayor parte de las reservas hídricas de los sistemas, lo que acompañado a los

bajos niveles de precipitación y mayor demanda hídrica se expresa en bajos CE (Figura 9). Blume et al. (2007) reportó semejante desfase en la producción de agua al analizar los coeficientes de escorrentía ante eventos de fuerte precipitación en cuencas en la cordillera de la IX región, señalando que el agua que escurre luego de una lluvia no es necesariamente producto de la misma, sino que lleva también un componente de agua residual que está almacenada en el sistema.

El máximo en ambas cuencas corresponde a la temporada 2005-06, con $C=0,8$ en Cauquenes y $C= 0,68$ en Purapel, mientras el mínimo ronda $C=0,27$ para ambas cuencas, registrándose en la temporada 2004-05 en Purapel ($C=0,28$) y 2010-11 en Cauquenes ($C=0,27$). La estación más variable corresponde a la temporada de verano, con un $CV>90\%$ en ambas cuencas, mientras la más estable corresponde a primavera en Cauquenes y otoño en Purapel ($CV=34\%$ y 33% , respectivamente).

Se identificó la existencia de datos anómalos o outliers en Cauquenes en las temporadas de primavera (ason) en 2001-02 ($CE=1,07$) y 2005-06 ($CE= 1,13$) y verano (defm) en 2008-09 ($CE= 8,4$). En Purapel se detectaron outliers en 2005-06 en primavera ($CE= 1,08$) y verano ($CE= 2,9$) y en 2008-09 en verano ($CE= 7,26$).

La ocurrencia de estos errores se asocia a temporadas con precipitaciones muy bajas en que se registra caudal, el que puede asociarse al flujo base y la capacidad de almacenamiento del sistema ya que, por lo general, en cuencas forestales el caudal instantáneo está más asociado a eventos de precipitación pasados antes que a las lluvias del momento (Blume et al., 2007). Por otro lado, en estos casos las magnitudes del caudal y precipitación registradas son pequeñas, por lo que el error asociado a la medición aumenta en términos relativos. El Coeficiente de Escorrentía es muy sensible a estas variaciones al ser una relación entre ambas magnitudes, reflejándose en la ocurrencia de valores anómalos. De esta manera, no se utilizaron los coeficientes identificados como outliers al representar una condición extrema poco frecuente en el funcionamiento normal de la cuenca, así como por la incerteza que introduce en el análisis por el alto nivel de error que presentan los datos.

Analizando el comportamiento de los datos se ve que en la cuenca de Cauquenes se registra una tendencia a la baja, tanto anual como estacionalmente, aunque ninguna es estadísticamente significativa ($p>0.05$, Figura 11.a). En el caso de Purapel no se observan tendencias marcadas o significativas (Figura 11b).

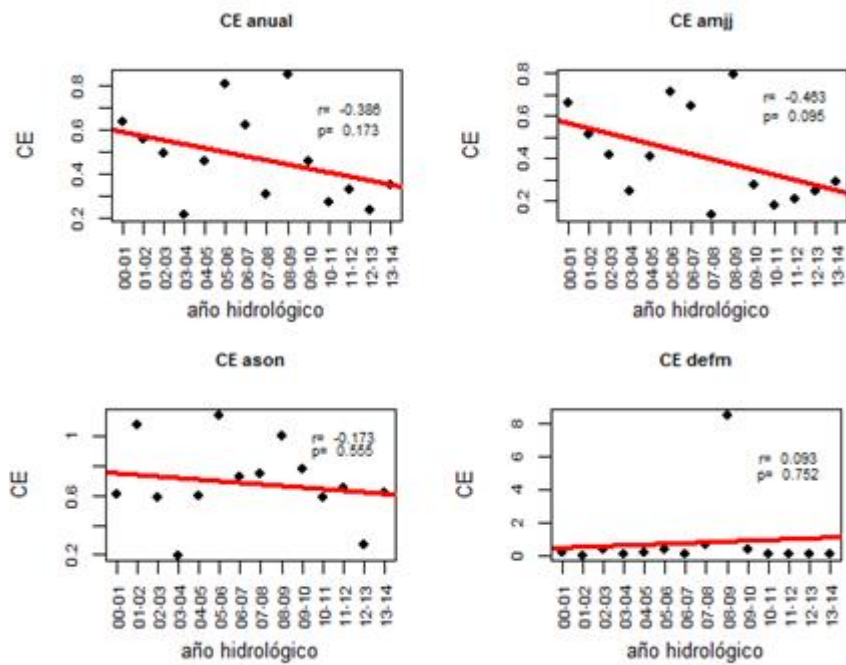


Figura 11.a Comportamiento de los coeficientes de escorrentía a escala anual y estacional, en el periodo 2000-2014, en la cuenca de Cauquenes.

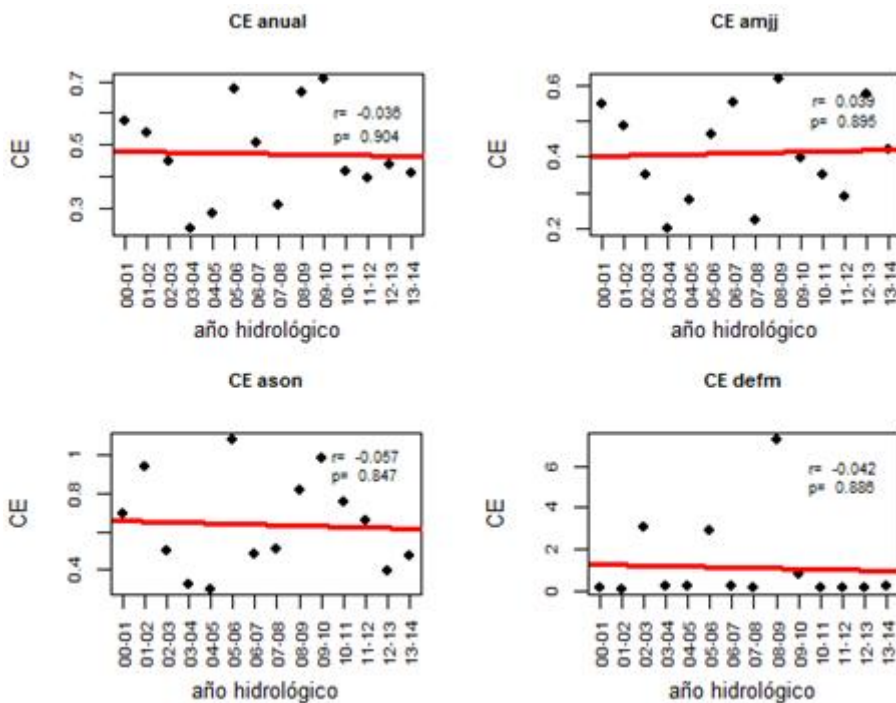


Figura 11.b Comportamiento de los coeficientes de escorrentía a escala anual y estacional, en el periodo 2000-2014, en la cuenca de Purapel

Relaciones entre variables de paisaje y Coeficiente de Escorrentía

A partir del análisis de correlación realizado se detectaron correlaciones estadísticamente significativas entre variables estructurales de paisaje y el coeficiente de escorrentía en ambas cuencas, fenómeno observado tanto a escala anual como estacional (anexo 10).

Efectos de la composición a nivel de posición en el paisaje sobre el coeficiente de escorrentía

A nivel anual destaca la correlación negativa detectada entre el Coeficiente de Escorrentía y la superficie de Plantaciones Industriales en Pendientes (Ppend, atributo de ubicación en el paisaje) en Cauquenes ($\rho = -0.71$; $p < 0.05$) (Figura 12, Rho representa el coeficiente de correlación de Spearman, p la significancia), lo que significa que se han asociado inversamente la capacidad del paisaje de transformar precipitación en escorrentía y la superficie de Plantaciones Industriales en la geofoma de Pendientes, lo que representa la cobertura de suelo más extensa en la cuenca, con un promedio de 24% de la superficie total en el periodo 2000-2014 (Cuadro 8).

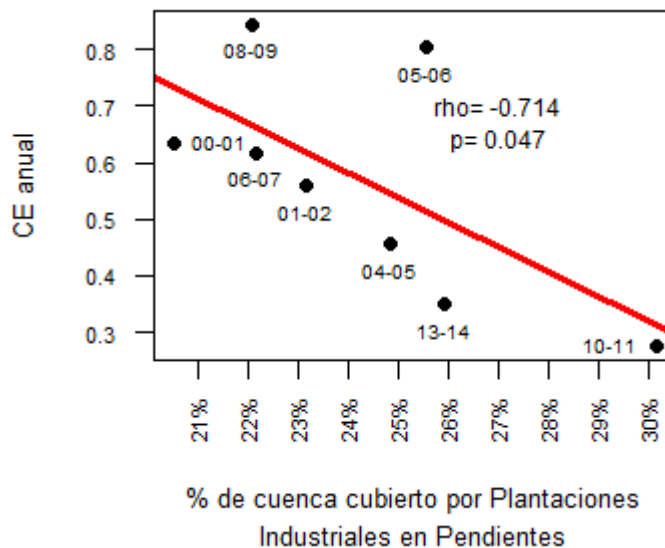


Figura 12. Correlación entre Plantación en Pendientes y Coeficiente de Escorrentía a escala anual en Cauquenes y Purapel.

Este resultado coincide con lo descrito por varios autores al estudiar la relación entre Coeficiente de Escorrentía y la superficie de plantaciones de Pino radiata en cuencas templadas y mediterráneas en Chile y España (Lara et al., 2009; Little et al., 2009; Garmendia et al., 2012), donde se observa que un aumento en la superficie de las plantaciones tiene un efecto negativo en la cosecha de agua. En particular, Lara et al. (2009) estimaron que el aumento en 10% en la superficie de plantaciones de pino genera una disminución de 20,4% en la escorrentía de verano en cuencas templadas de la región de los Ríos.

Al estudiar las transiciones de clase de cobertura en el periodo 2000-2014, se observa que en ambas cuencas la mayor parte del incremento de la clase Plantaciones Industriales ocurrió en zonas cubiertas por Matorral en el año 2000 (Cuadro 13). Esta tendencia es comentada por Aguayo (2009) en la zona de Ñuble-Araucanía en el periodo 1979-2000, y con más detalle por CONAF (2011) para las provincias de Talca y Cauquenes entre 1999 y 2008, donde se indicó que la mayoría de las plantaciones instaladas en las provincias señaladas en ese periodo de tiempo fueron establecidas en zonas agrícolas abandonadas y matorrales, siendo menor la superficie de bosque nativo sustituido en igual periodo. A partir de esto, se puede inferir que una porción importante las nuevas plantaciones establecidas en el periodo de estudio se explican por sustitución de coberturas de Matorral y praderas abandonadas.

Cuadro 13. Porcentaje de superficie de Plantaciones Industriales en 2000-01 que cambió a otras coberturas en 2013-14, en las cuencas de Cauquenes y Purapel.

Cuenca	Bosque Nativo	Matorral	Plantaciones Industriales	Otros
Cauquenes	5,6%	18%	56,7%	19,7%
Purapel	5,7%	47,3%	38,7%	7,3%

Considerando este patrón de sustitución se podría explicar la naturaleza negativa de la correlación detectada. Farley et al. (2005), analizando datos de 26 cuencas en distintas regiones del mundo, reportó disminuciones significativas en la escorrentía en lugares donde se forestaron praderas y matorrales con especies como eucaliptus y pino, coincidiendo con Huber et al. (2008) quienes, investigando los efectos de plantaciones de pino radiata en el balance hidrológico desde Maule hasta los Ríos en Chile, señala que las plantaciones tienen un efecto negativo sobre la producción de agua producto de la mayor ET, interceptación y almacenamiento en el suelo que zonas de matorrales y praderas, así como por el aumento de la compactación del suelo producto del manejo asociado (Soto et al., 2015).

De esta manera, al instalarse las plantaciones en zonas desprovistas de vegetación arbórea o donde esta está dispersa y es de menor tamaño, se altera el balance hídrico generándose mayores niveles de retención y consumo de agua y, por consiguiente, disminuyendo el coeficiente de escorrentía.

Efectos de la Fragmentación del paisaje sobre el coeficiente de Escorrentía

Varios indicadores del atributo de Complejidad de Forma de Parche a escala de paisaje mostraron correlaciones positivas estadísticamente significativas con el CE, tanto a escala anual y estacional en ambas cuencas.

En específico, la mediana del índice Fractal Dimension Index (FRAC_MD) mostró una correlación positiva y significativa con el coeficiente de escorrentía a escala anual y en otoño (Figura 13 (A)), mientras que en verano también se detectaron correlaciones idénticas, significativas y positivas, entre el coeficiente de escorrentía y las variables FRAC_MD y la mediana del Shape Index (SHAPE_MD) (Figura 13(B), solo se muestra una). En la cuenca de Purapel, el índice Perimeter-Area Fractal Dimension (PAFRAC) mostró una correlación positiva con el CE de primavera (ASON) (Figura 14A), mientras que la desviación estándar y el coeficiente de variación del índice Shape Index (SHAPE_SD y SHAPE_CV) mostraron una correlación positiva e idéntica con el CE de la temporada de verano (Figura 14B).

Todos estos indicadores del atributo Complejidad de Forma de Parche son derivados del área y perímetro de parche, diferenciándose solamente en la forma de cálculo. Como tal, reflejan la dinámica de un mismo atributo del paisaje por lo que tiene sentido que expresen el mismo comportamiento en el tiempo: una correlación positiva con el CE.

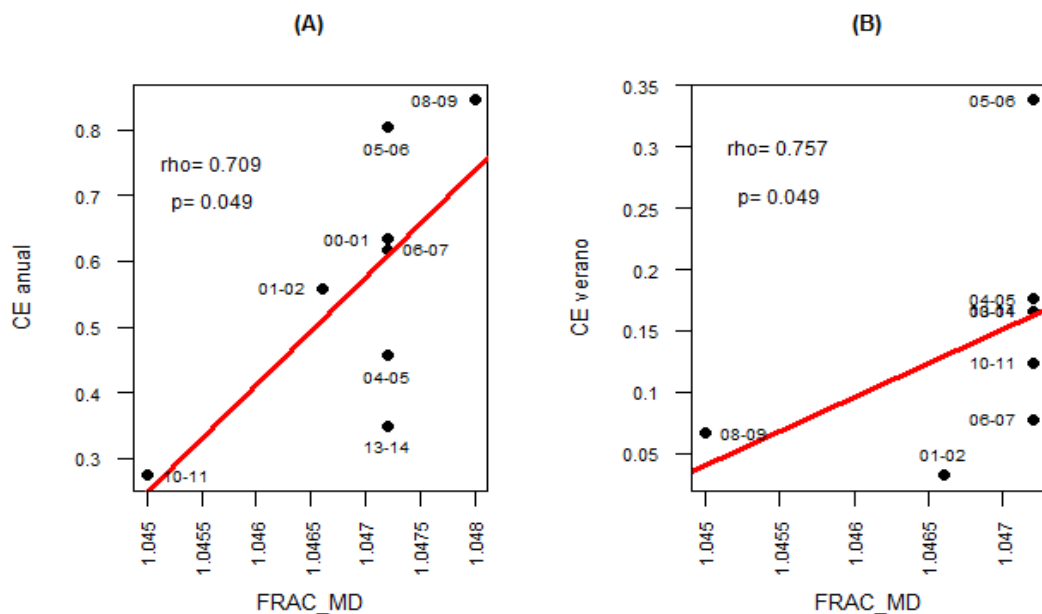


Figura 13. Correlaciones estadísticamente significativas entre Mediana de Índice de Dimensión Fractal (FRAC_MD) y el coeficiente de escorrentía a escala anual (A) y en verano (B) en la cuenca de Cauquenes.

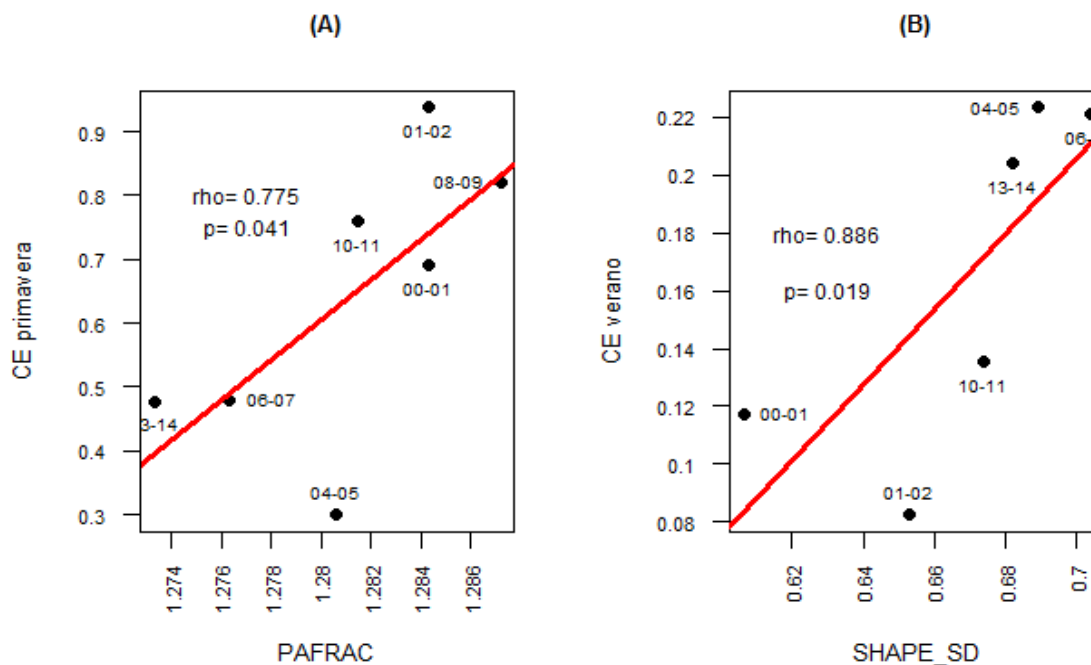


Figura 14. Relación entre índice Perimeter-Area Fractal Dimension Index (PAFRAC) y Coeficiente de escorrentía de primavera y Desviación estándar del índice SHAPE (SHAPE_SD) y Coeficiente de escorrentía de verano en la cuenca de Purapel

La complejidad de forma de parche se ha utilizado como indicador del estado de fragmentación de un territorio ante eventos externos de perturbación (Coops et al. 2010; Styers et al. 2010; Coskun, 2013; Shi et al. 2013) donde, en general, paisajes poco intervenidos tenderán a mostrar parches continuos y de formas simples, y a medida que aumenta la intervención estos se van subdividiendo y, por ende, tomando formas más complejas.

La dinámica sucesional de los monocultivos industriales y los efectos de la acción antrópica son los principales forzantes de la fragmentación del paisaje en la zona de estudio, generando cambios en la estructura y composición de la vegetación existente (Echeverría et al. 2006; Pizarro et al. 2006; Echeverría et al. 2007; CONAF, 2011; Little et al. 2009; Altamirano y Lara 2010; Zamorano-Elgueta et al. 2015).

La transición desde una plantación adulta (Figura 15 (A)) a suelos desnudos (talas rasas), praderas y matorrales (terrenos abandonados post-cosecha, Figura 15 (B)) y plantaciones jóvenes (Figura 15 (C)), producto del ciclo de cosecha y replantación, puede alterar el CE. La emergencia de estas zonas, de vegetación más dispersa y con menor densidad de copa producto de la creciente fragmentación e intervención de las superficies forestadas (naturales y antrópicas), podría generar un aumento del CE ya que en esas zonas las pérdidas de agua por intercepción, percolación y evapotranspiración son menores que en plantaciones adultas,

como ya se explicó anteriormente, producto del cambio en las propiedades edafológicas y en la cobertura vegetal local (Farley et al. 2005, Huber et al. 2008, Soto et al., 2015).

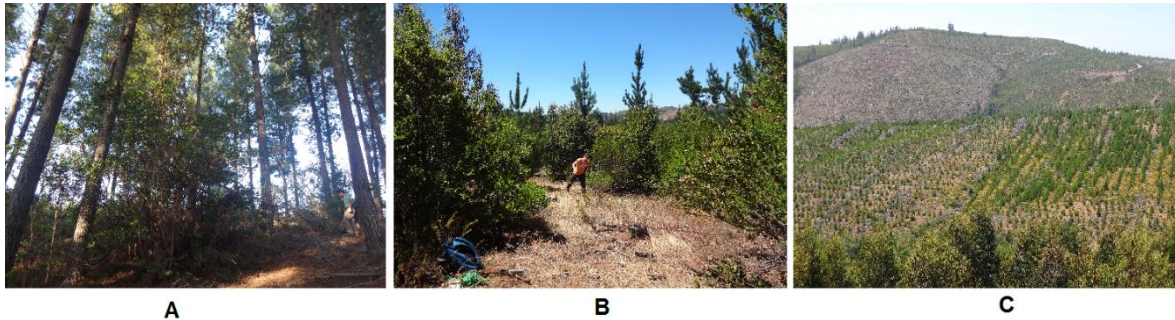


Figura 15. Diferentes coberturas vegetales dentro del ciclo de cosecha forestal en la cuenca de Cauquenes: A) Plantación Adulta; B) Matorral emergido post-cosecha y abandono; C) Plantación Joven.

Este fenómeno fue observado por Lana-Renault et al. (2011), trabajando en los pirineos españoles, donde se reportó que zonas forestales con mayores niveles de degradación y fragmentación del paisaje producto de un pasado con fuerte uso agrícola mostraron mayores caudales de salida ante los mismos eventos de lluvia que cuencas forestadas no intervenidas, producto del aumento de la escorrentía directa debido a la mayor compactación y degradación del suelo por su historia de uso.

Efectos de la vegetación asociada a cursos de agua sobre el coeficiente de escorrentía

Se detectó una correlación positiva y estadísticamente significativa entre la superficie de Matorrales en fajas de 30 m desde el cauce y el CE de verano solamente en la cuenca de Purapel, siendo la única que relacione la composición de fajas asociadas a los cauces de agua y el CE tanto anual como estacionalmente en ambas cuencas (Figura 16).

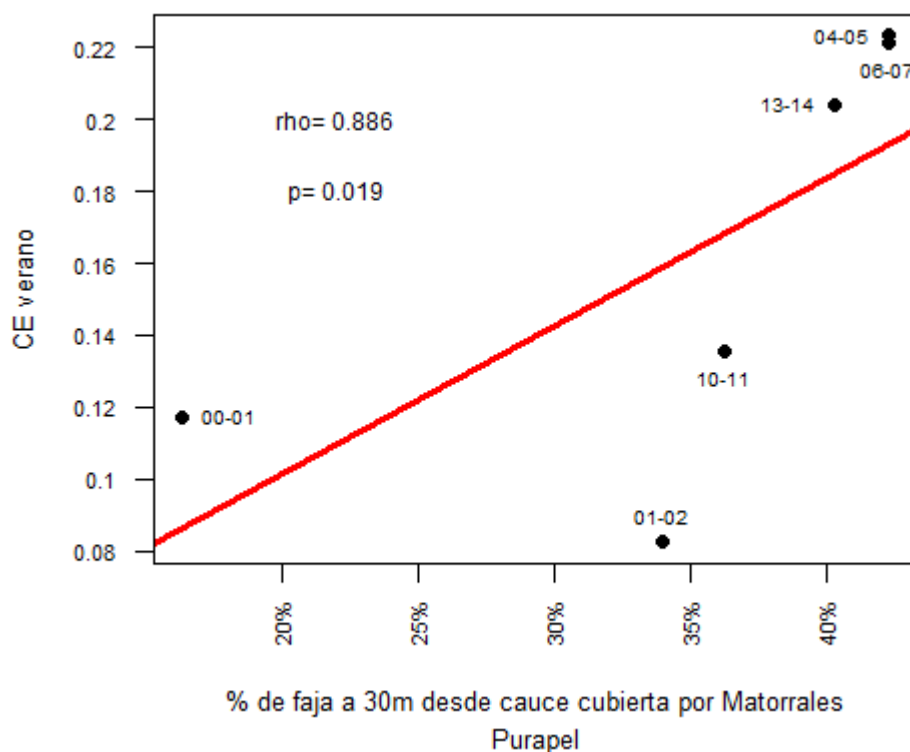


Figura 16. Correlación entre superficie de matorrales en torno a cauces de agua y CE en verano en la cuenca de Purapel.

Los resultados obtenidos apuntan a que el aumento de la cobertura de Matorral asociado a cursos de agua podría tener un efecto positivo en la generación de escorrentía en temporada seca en la zona de Purapel (Figura 15). Little et al. (2014) reportó un comportamiento similar trabajando en la región de los Ríos en cuencas pequeñas (~1000 ha) forestadas con eucaliptus, en que la presencia de vegetación nativa aledaña a cauces de agua tuvo un efecto positivo sobre la producción de agua en verano, llegando a contrarrestar los efectos negativos de las plantaciones de eucaliptus sobre el caudal.

En el secano interior del Maule las precipitaciones se concentran entre abril y noviembre (Pizarro et al., 2006; Little et al., 2009), por lo que el caudal en temporada seca está fuertemente relacionado con la precipitación de primavera ($\rho^3=0,662$, $p<0,05$). Esta se expresa a través de flujo base y corresponde al principal componente del caudal de verano en la zona. La correlación observada se puede explicar presumiblemente debido a la mayor reserva hídrica que poseen los suelos con cobertura de matorral, los que están sujetos a un menor nivel de consumo y pérdida de agua en relación a coberturas como plantaciones de pino (Farley et al., 2005; Huber et al, 2008; Olivera-Guerra et al., 2014). Esto permite que

³ Coeficiente de correlación de Spearman (Spearman's rho)

un mayor porcentaje del flujo base se exprese como escorrentía directa en vertientes y quebradas, llegando finalmente al cauce principal y generando mayores caudales que redundan en mayores coeficientes de escorrentía en verano.

Esta relación no es vista en Cauquenes probablemente debido al enmascaramiento de la señal en el efecto local de usos de suelo aguas abajo (Warburton et al., 2012) producto de la mayor superficie de la cuenca con respecto a Purapel (228% más grande) y diferencias en configuración (mayor superficie de plantaciones aguas abajo) y topografía (relieve menos abrupto que disminuye la velocidad de escurrimiento y la expresión del efecto de la cobertura de suelo sobre la hidrología en el punto de control).

Análisis de la temporalidad de los resultados

Los resultados presentados sugieren la existencia de posibles relaciones entre variables de configuración y estructura de paisaje y el coeficiente de escorrentía a escala anual y estacional en ambas cuencas analizadas. Al considerar la inexistencia de un proceso continuo e intenso de cambio de cobertura de suelo dentro del periodo de estudio (Figura 5) se puede inferir que las correlaciones identificadas obedecerían a cambios estocásticos en el arreglo del paisaje, generados por las operaciones forestales, antes que a fuertes cambios en la composición o el estado de funcionamiento de paisaje. Esto se confirma al observar la temporalidad de los datos en las correlaciones (rótulos de años) en las figuras 11, 13, 14 y 15, donde se observa una alta dispersión de los datos en términos temporales, sin observarse una secuencia temporal lineal. Estos resultados apuntan a que la falta de estrategias de manejo forestal a escala de cuenca, manifestado como cambios aleatorios en la configuración de parches dentro de la cuenca, tiene un impacto en la hidrología de la cuenca expresada a partir de los coeficientes de escorrentía, lo que abre nuevas interrogantes sobre la gestión de territorios forestales a escala de cuenca.

CONCLUSIONES

La dinámica que define el arreglo del paisaje en el periodo 2000-2014 muestra variabilidad en las diferentes métricas de configuración y estructura, sin embargo, no se registran tendencias marcadas o cambios bruscos en ninguna variable que indique que el paisaje está transitando de un estado a otro. Se concluye que el paisaje no ha experimentado cambios de estado en el periodo de estudio, siendo la variabilidad observada atribuida a la dinámica del ciclo productivo forestal, principal modelador del paisaje en la zona, la que muestra un comportamiento estocástico en el tiempo y el espacio. La excepción observada en las Plantaciones Industriales en Purapel, donde se registró una disminución sostenida en el tiempo, es explicada por la mayor importancia relativa que extensas cosechas tienen en la cuenca por el menor tamaño de esta, así como por confusiones en la diferenciación y clasificación de plantaciones jóvenes y zonas de Matorral.

Se detectaron correlaciones estadísticamente significativas entre algunas variables de configuración del paisaje y el coeficiente de escorrentía, tanto a escala anual como estacional, las que obedecen a los cambios estocásticos en el paisaje antes que aun proceso sostenido e intenso de cambio de composición en el tiempo. Estas sugieren que los cambios en términos de la Configuración del paisaje producto del uso forestal intensivo y extensivo a que está sujeto el territorio podrían llegar a afectar funciones ecosistémicas como la producción de escorrentía, tanto a escala anual como estacional, en el corto plazo y escalas espaciales de cientos de km². Estos resultados vienen a complementar investigaciones anteriores que han descrito resultados similares abordando el fenómeno desde el punto de vista de la Composición del paisaje y analizando escalas espaciales menores, acotadas a cientos a pocos miles de hectáreas, o comparando paisajes con arreglos altamente contrastantes en términos de composición.

A la luz de los resultados obtenidos y en el doble contexto de una fuerte expansión de la industria forestal hacia el Sur y la creciente incertidumbre en la provisión de agua en temporada seca en la zona centro-sur del país, es necesario seguir investigando con mayor detalle los posibles efectos que la expansión de la frontera forestal puede tener sobre provisión de servicios ecosistémicos tan vitales para la población como puede ser la provisión de agua y regulación de los ciclo hidrológicos, entre otros.

En ese sentido, el uso del coeficiente de escorrentía mostró complicaciones al analizar temporadas sin lluvias, generándose datos anómalos que disminuyen el tamaño muestral y reducen la precisión de los análisis. En el futuro se recomienda la utilización de otras técnicas que permitan analizar los datos con mayor independencia de la precipitación, principal modelador de la escorrentía en la zona, como puede ser los residuos de una regresión entre

Escorrentía y Precipitación. Así también se vio que la utilización de una clasificación de geoformas netamente topográfica puede llevar a generalizaciones del territorio y clasificaciones sin una relación funcional con el fenómeno estudiado, por lo que se recomienda la delimitación del paisaje basada en segmentos hidrológicos de la cuenca o en la magnitud de la pendiente, al ser atributos más relacionados funcionalmente con el ciclo hidrológico. Por último, se recomienda la utilización de sensores de mayor resolución espectral y espacial, como Sentinel-2A o SPOT, así como evaluar la posibilidad de incorporar datos hiperespectrales para mejorar la caracterización más precisa de las coberturas de suelo.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguayo, M. 2009. Cambio del uso del suelo en el centro sur de Chile a fines del siglo XX . Entendiendo la dinámica espacial y temporal del paisaje. *Revista Chilena de Historia Natural* 82: 361-374.
- Altamirano, A.; Lara, A. 2010. Deforestación en ecosistemas templados de la precordillera andina del centro-sur de Chile. *Bosque (Valdivia)* 31(1): 53-64.
- Armesto, J.; Arroyo, M.; Hinojosa, L. 2007. The Mediterranean environment of central Chile. *The physical geography of South America* 2007: 184-199.
- Aronson, J.; Del Pozo, A.; Ovalle, C.; Avendaño, J.; Lavin, A.; Etienne, M. 1998. Land use changes and conflicts in central Chile. *Landscape disturbance and biodiversity in Mediterranean-type ecosystems* 1998: 155-168.
- Beven, K.; Kirby, M. 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin* 24(1): 43-69.
- Blaszczynski, J. 1997. Landform characterization with geographic information systems. *Photogrammetric Eng. Remote Sens.* 63: 183-191.
- Blume, T.; Zehe, E.; Bronstert, A. 2007. Rainfall – runoff response, event-based runoff coefficients and hydrograph separation. *Hydrological Sciences Journal* 52(5): 843-862.
- Canty, M. 2014. Image analysis, classification and change detection in remote sensing, with algorithms for ENVI/IDL and Python, 3a edición. Taylor & Francis CRC Press.
- Carranza, M.; Hoyos, L.; Frate, L.; Acosta, A.; Cabido, M. 2015. Measuring forest fragmentation using multitemporal forest cover maps: forest loss and spaial pattern analysis in the Gran Chaco, central Argentina. *Landscape and urban planning* 143: 238-247.
- Ceballos, A.; Hernández, J.; Corvalán, P.; Galleguillos, M. 2015. Comparison of Airborne LiDAR and Satellite Hyperspectral Remote Sensing to Estimate Vascular Plant Richness in Deciduous Mediterranean Forests of Central Chile. *Remote Sensing* (7): 2692-2714.
- CR(2) (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia), Chile. 2017. Explorador Climático. Disponible en <<http://explorador.cr2.cl>>. Consultado el: 10 de enero de 2017.
- Chuvieco, E. 2008. Teledetección ambiental: la observación de la tierra desde el espacio. 3ª edición. Ariel Ciencias. Barcelona, España. 594p.

Coffey, R. 2013. The difference between “land use” and “land cover” [en línea]. East Lansing, Michigan, EEUU. Recuperado en <http://msue.anr.msu.edu/news/the_difference_between_land_use_and_land_cover>. Consultado el 6 de octubre de 2016.

Conacher, A.; Sala, M. 1998. Land degradation in Mediterranean environments of the world. Nature and extent, causes and solutions. Wiley, Chichester.

Coops, N.; Gillanders, S.; Wulder, M.; Gergel, S.; Nelson, T.; Goodwin, N. 2010. Assessing changes in forest fragmentation following infestation using time series Landsat imagery. *Forest Ecology and Management* 259: 2355-2365.

CONAF (Corporación Nacional Forestal), Chile. 2011. Catastro de Usos de Suelo y Vegetación, Monitoreo y actualización región del BioBío (periodo 1998-2008) y región del Maule (periodo 1999-2009). Gerencia Forestal, Departamento de Fiscalización y Monitoreo de Ecosistemas Forestales, Sección de Monitoreo de Ecosistemas Forestales.

Coskun, C. 2013. Quantifying landscape pattern and connectivity in a Mediterranean coastal settlement: The case of the Urla district, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment* 185(1): 143-155.

Echeverría, C.; Coomes, D.; Hall, M.; Newton, A. 2008. Spatially explicit models to analyze forest loss and fragmentation between 1976 and 2020 in southern Chile. *Ecological Modelling* 212(3-4): 439-449.

Echeverría, C.; Coomes, D.; Salas, J.; Rey-Benayas, J.; Lara, A.; Newton, A. 2006. Rapid deforestation and fragmentation of Chilean Temperate Forests. *Biological Conservation* 130(4): 481-494.

Echeverría, C.; Newton, A.; Nahuelhual, L.; Coomes, D.; Rey-Benayas, J. 2012. How landscapes change: Integration of spatial patterns and human processes in temperate landscapes of southern Chile. *Applied Geography* 32(2): 822-831.

Echeverría, C.; Newton, A.C.; Lara, A.; Benayas, J.; Coomes, D.A. 2007. Impacts of forest fragmentation on species composition and forest structure in the temperate landscape of southern Chile. *Global Ecology and Biogeography* 16(4): 426-439.

Farley, K.; Jobbágy, E.; Jackson, R. 2005. Effects of afforestation on water yield: A global synthesis with implications for policy. *Global Change Biology* 11(10): 1565-1576.

Foley, J. 2005. Global Consequences of Land Use. *Science* 309 (5734): 570-574.

Gasparri, N.; Grau, H. 2009. Deforestation and fragmentation of Chaco dry forest in NW Argentina (1972-2007). *Forest Ecology and Management* 258(6): 913-921.

Gao, Y.; Zhang, W., 2009. A simple empirical topographic correction method for ETM+ imagery. *International Journal of Remote Sensing* 30: 2259–2275.

- Garmendia, E.; Mariel, P.; Tamayo, I.; Aizpuru, I.; Zabaleta, A. 2012. Assessing the effect of alternative and uses in the provision of water resources: evidence and policy implications from southern Europe. *Land use policy* 29: 761-770.
- Gerding, V. 1991. Manejo de las plantaciones de *Pinus radiata* D. Don. en Chile. *Bosque* 12(2): 3-10.
- Gitelson, A.; Kaufman, Y.; Merzlyak, M. 1996. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote sensing of environment* 58(3): 289-298.
- Hantson, S.; Chuvieco, E. Evaluation of different topographic correction methods for landsat imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 13: 691-700.
- Hernández, A.; Miranda, M.; Arellano, E.; Dobbs, C. 2016. Landscape trajectories and their effect on fragmentation for a Mediterranean semi-arid ecosystem in Central Chile. *Journal of Arid Environments* 127: 74-81.
- Horning, N. 2004. Selecting the appropriate band combination for an RGB image using Landsat imagery Version 1.0 [en línea]. American Museum of Natural History, Center for Biodiversity and Conservation. Disponible en <<http://biodiversityinformatics.amnh.org>>. Consultado el 4 de enero de 2017.
- Huber, A.; Iroumé, A.; Bathurst, J. 2008. Effect of *Pinus radiata* plantations on water balance in Chile. *Hydrological Processes* 22 (Mayo 2007): 142-148.
- Jia, K.; Liang, S.; Zhang, N.; Wei, X.; Gu, X.; Zhao et al. 2014. Land cover classification of finer resolution remote sensing data integrating temporal features from time series coarser resolution data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 93: 49-55.
- Jordan, R.; Caro, E.; Kim, Y.; Kobrick, M.; Shen, Y.; Stuhr, F. 1996. Shuttle radar topography mapper (SRTM), *Proc, SPIE*, 2958: 412-422.
- Lana-Renault, N.; Latron, J.; Karssenberg, D.; Serrano-Muela, P.; Regüés, D.; Bierkens, M. 2011. Differences in stream flow in relation to changes in land cover: A comparative study in two sub-Mediterranean mountain catchments. *Journal of Hydrology* 411: 366-378.
- Lara, A.; Little, C.; Urrutia, R.; McPhee, J.; Álvarez-Garretón, C.; Oyarzún et al. 2009. Assessment of ecosystem services as an opportunity for the conservation and management of native forests in Chile. *Forest Ecology and Management* 258 (4): 415-424.
- Liang, W.; Uchida, T. 2014. Effects of topography and soil depth on saturated-zone dynamics in steep hillslopes explored using the three-dimensional Richard's equation. *Journal of Hydrology* 510: 124-136.

- Little, C.; Lara, A.; McPhee, J.; Urrutia, R. 2009. Revealing the impact of forest exotic plantations on water yield in large scale watersheds in South-Central Chile. *Journal of Hydrology* 374(1-2): 162-170.
- Little, C.; Cuevas, J.; Lara, A.; Pino, M.; Scoenholtz, S. 2014. Buffer effects of streamside native forest on water provision in watersheds dominated by exotic forest plantations. *Ecohydrology* (2014).
- Le Maire, G.; Dupuy, S.; Nouvellon, Y.; Loos, RA.; Hakamada, R. 2014. Mapping short-rotation plantations at regional scale using MODIS time series: Case of eucalypt plantations in Brazil. *Remote Sensing of Environment* 152: 136-149.
- Luebert, F.; Pliscoff, P. 2006. Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile. 1ª edición. Editorial Universitaria. 316p.
- McGarigal, K.; Cushman, S.; Ene, E. 2012. FRAGSTATS v4: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical and Continuous Maps. Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst [en línea]. Disponible en: <<http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>>. Consultado el 10 de enero de 2017.
- Millenium Ecosystem Assesment. 2003. Ecosystems and human well-being: a framework for assessment. Island Press, Washington DC.
- Millenium Ecosystem Assesment. 2005. Ecosystems and human well-being: synthesis. Island Press, Washington DC.
- Miranda, A.; Altamirano, A.; Cayuela, L.; Pincheira, F.; Lara, A. 2015. Different times, same story: Native forest loss and landscape homogenization in three physiographical areas of south-central of Chile. *Applied Geography* 60: 20-28.
- Miranda, A.; Altamirano, A.; Cayuela, L.; Lara, A.; González, M. 2016. Native forest loss in Chilean biodiversity hotspot: revealing the evidence. *Regional Environmental Change* (2016): 1-13.
- Olivera-Guerra, L.; Mattar, C.; Galleguillos, M. 2014. Estimation of real evapotranspiration and its variation in Mediterranean landscapes of central-southern Chile. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 28(1): 160-169.
- Padma, S.; Sanjeevi, S. 2014. Jeffries Matusita based mixed-measure for improved spectral matching in hyperspectral image analysis. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 32: 138-151.
- Patterson, M.; Hoalst-Pullen, N. 2011. Dynamic equifinality: The case of south-central Chile's evolving forest landscape. *Applied Geography* 31(2): 641-649.

Pizarro, R.; Araya, S.; Jordán, C.; Farías, C.; Flores, JP.; Bro, PB. 2006. The effects of changes in vegetative cover on river flows in the Purapel river basin of central Chile. *Journal of Hydrology* 327(1-2): 249-257.

Puyravaud, JP. 2003. Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management* 177(1-3): 593-596.

Rouse, J.; Haas, R.; Schell, J.; Deering, D. 1974. Monitoring vegetation systems in the great plains with erts. *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium Volume I: Technical Presentations*. NASA SP-351, compiled and edited by Stanley C. Freden, Enrico P. Mercanti, and Margaret A. Becker, 1994 pages, published by NASA, Washington, D.C., 1974, p.309.

Schultz, J.; Cayuela, L.; Echeverría, C.; Salas, J.; Rey, J. 2010. Monitoring land cover change of the dryland forest landscape of central Chile (1975-2008). *Applied Geography* 30(3): 436-447.

SERNAGEOMIN (Servicio Nacional de Geología y Minería), Chile. 2003. Mapa geológico de Chile: versión digital. Publicación geológica digital n°4. Escala 1:1.000.000.

Shi, Z.; Ai, L.; Li, X.; Huang, X.; Wu, G.; Liao, W. 2013. Partial least-squares regression for linking land-cover patterns to soil erosion and sediment yield in watersheds. *Journal of Hydrology* 498: 165-176.

Sorensen, R.; Zinko, U.; Seibert, J. 2006. On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observations. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions, European Geosciences Union* 10(1): 101-112.

Soto, L.; Seguel, O.; Sotomayor, B.; Lara, A.; Galleguillos, M. 2015. TITULO. Poster en: Congreso “Soil Functions and Climate Change - do we underestimate the consequences of new disequilibria in soil properties? – SUSTAIN”. Kiel, Alemania, 23-26 de septiembre de 2015.

Styers, D.; Chappelka, A.; Marzen, L.; Somers, G. 2010. Developing a land-cover classification to select indicators of forest ecosystem health in a rapidly urbanizing landscape. *Landscape and Urban Planning* 94(3-4): 158-165.

Teillet, P.; Guindon, B.; Goodenough, D. 1982. On the slope-aspect correction of multispectral scanner data. *Canadian Journal of Remote Sensing* 8: 84–106.

Uddin, K.; Chaudhary, S.; Chettri, N.; Kotru, R.; Murty, M.; Chaudhary, R et al. 2015. The changing land cover and fragmenting forest on the roof of the world: a case study in Nepal’s Sacred Landscape. *Landscape and Urban Planning* 141: 1-10.

USGS (United States Geological Survey), EEUU. 2015. Frequently asked questions about the landsat missions. Disponible en

<http://landsat.usgs.gov/band_designations_landsat_satellites.php>. Consultado el 26/8/2016.

USGS (United States Geological Survey), EEUU. 2017. Earth Explorer [en línea]. Disponible en <<http://earthexplorer.usgs.gov/>>. Consultado el 10 de enero de 2017.

Verbesselt, J.; Hyndman, R.; Newnham, G.; Culvenor, D. 2010a. Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. *Remote Sensing of Environment* 114(1): 106-115.

Verbesselt, J.; Hyndman, R.; Zeileis, A.; Culvenor, D. 2010b. Phenological change detection while accounting for abrupt and gradual trends in satellite image time series. *Remote Sensing of Environment* 114(12): 2970-2980.

Warburton, M.; Schulze, R.; Jewitt, G. 2012. Hydrological impacts of land use change in three diverse South African catchments. *Journal of Hydrology* 414-415: 118-135.

Weiss, A. 2001. Topographic Position and landform analysis. Poster Presentation. ESRI International User Conference, San Diego, CA.

Zamorano-Elgueta, C.; Rey Benayas, J.; Cayuela, L.; Hantson, S.; Armenteras, D. 2015. Native forest replacement by exotic plantations in southern Chile (1985-2011) and partial compensation by natural regeneration. *Forest Ecology and Management* 345: 10-20.

ANEXOS

Anexo 1. Ubicación, código DGA y tipo de información para estaciones utilizadas en el estudio (proyección UTM huso 18, Datum WGS84)

Estación	Código DGA	Tipo de información	Coord. E (m)	Coord. N (m)
Cauquenes en el Arrayán	7336001	Fluviométrica	735824	6010971
Cauquenes en Desembocadura	7339001	Fluviométrica	766268	6023058
Purapel en Sauzal	7343001	Fluviométrica	765255	6039747
Purapel en Nirivilo	7341001	Fluviométrica / Meteorológica	762895	6062028
Quella	7335004	Meteorológica	762759	6006504
El álamo	7336003	Meteorológica	732107	6000398

Anexo 2.a. Índices de estructura de paisaje utilizados (McGarical et al., 2012)

Los índices de fragmentación y estructura calculados a escala de paisaje se pueden agrupar de diferentes maneras. Al ser generalizaciones de métricas calculadas a escalas de parche o clase es necesario agruparlos a través de ciertas medidas de tendencia central. De esta forma se pueden obtener los siguientes índices de nivel 2:

Media aritmética (MN): correspondiente a la media aritmética de los valores de cada parche o clase de cobertura presentes dentro del paisaje en estudio. Es un indicador parche-céntrico al ponderar de igual forma todos los parches de un paisaje, representando la condición de un parche promedio dentro del territorio sin diferenciar superficie.

Media ajustada por área (AM): corresponde al valor medio de los parches del paisaje, ponderando el valor de cada parche por el porcentaje que éste representa de la cuenca. Éste medida tiene una connotación paisaje-céntrica al representar las condiciones promedio de un parche elegido al azar en el paisaje al considerar las diferencias en extensión y, por lo tanto, en probabilidad de selección.

Mediana (MD): correspondiente a la mediana de la distribución de valores del índice para los parches o clases presentes en el paisaje de estudio.

Coefficiente de Variación (CV): corresponde a la desviación estándar de los valores del índice para los parches o clases dentro del paisaje en estudio dividido por la media de los mismos.

Los índices calculados en la presente investigación y su significado son los siguientes:

Distancia Euclidiana al vecino más cercano (Euclidian Nearest Neighbour, ENN). Representa la menor distancia en línea recta desde el centroide de un parche de una clase determinada al centroide del vecino más cercano de igual clase. Se calcula a escala de parche y por clase, por lo que el valor a escala de paisaje corresponde a la media del índice para las diferentes clases.

Para este índice se calculó la media (ENN_MN), la mediana (ENN_MD) y el Coeficiente de Variación (ENN_CV)

El índice ENN_MN representa la media de los valores de cada parche dentro del paisaje.

El índice ENN_MD representa la mediana de los valores del índice dentro del paisaje.

Por último, el Coeficiente de Variación se calcula sobre la base de todos los valores calculados para cada parche dentro del paisaje en estudio.

Área media de Parche (AREA_MN). Este índice representa la superficie media de un parche en el paisaje (ha), calculada dividiendo la superficie total del paisaje en el número de parches existentes.

$$AREA = \frac{A}{NP}$$

Donde A= área total del paisaje en estudio (m²)

NP= número de parches total en el paisaje

Índice de Dimensión Fractal (FRAC). Este índice representa la complejidad de forma del parche y varía en una escala de 1 a 2, donde 1 representa formas simples (círculos, cuadrados) más cercanas a la geometría euclidiana, y 2 representa formas crecientemente complejas y *plane-filling*. Para determinarlo se utilizan el área y perímetro del parche de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$FRAC = \frac{2 \ln(0.25P)}{\ln A}$$

Donde A= área del parche (m²)

P= perímetro del parche (m)

Para este índice se calcularon la media aritmética (FRAC_MN), la media ajustada por área (FRAC_AM), la mediana (FRAC_MD) y el Coeficiente de Variación (FRAC_CV)

Índice de Dimensión Fractal Perímetro-Área (PAFRAC). Éste índice es parecido al anterior, con la diferencia que aplica regresiones lineales en su cálculo y, por lo tanto, tiende a fallar cuando el número de parches en el paisaje es reducido (n<20). Se utiliza como indicador de complejidad de forma a lo largo de varias escalas espaciales, y en específico representa cuánto perímetro incrementa por unidad de área incrementada

Se calcula de acuerdo a:

$$PAFRAC = \frac{\left[N \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\ln p_{ij} \cdot \ln a_{ij}) \right] - \left[\left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \ln p_{ij} \right) \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \ln a_{ij} \right) \right]}{\left(N \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \ln p_{ij}^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \ln p_{ij} \right)^2}$$

Índice de Forma de parche (SHAPE). Éste índice mide la complejidad de la forma de un parche con respecto a una forma de referencia de la misma superficie (un cuadrado). De esta manera supera el problema que significa la diferencia en aumento de la superficie con respecto al perímetro en formas crecientes. Varía entre 1 (forma cuadrada) y aumenta al infinito conforme la forma del parche se hace crecientemente compleja (no cuadrada). Se calcula a partir del perímetro (P) y área (A) del parche de la siguiente manera:

$$SHAPE = \frac{0.25P}{\sqrt{A}}$$

Donde A= área del parche (m²)

P= perímetro del parche (m)

Para este índice se calcularon la media aritmética (SHAPE_MN), la media ponderada por área (SHAPE_AM) y el coeficiente de variación (SHAPE_CV).

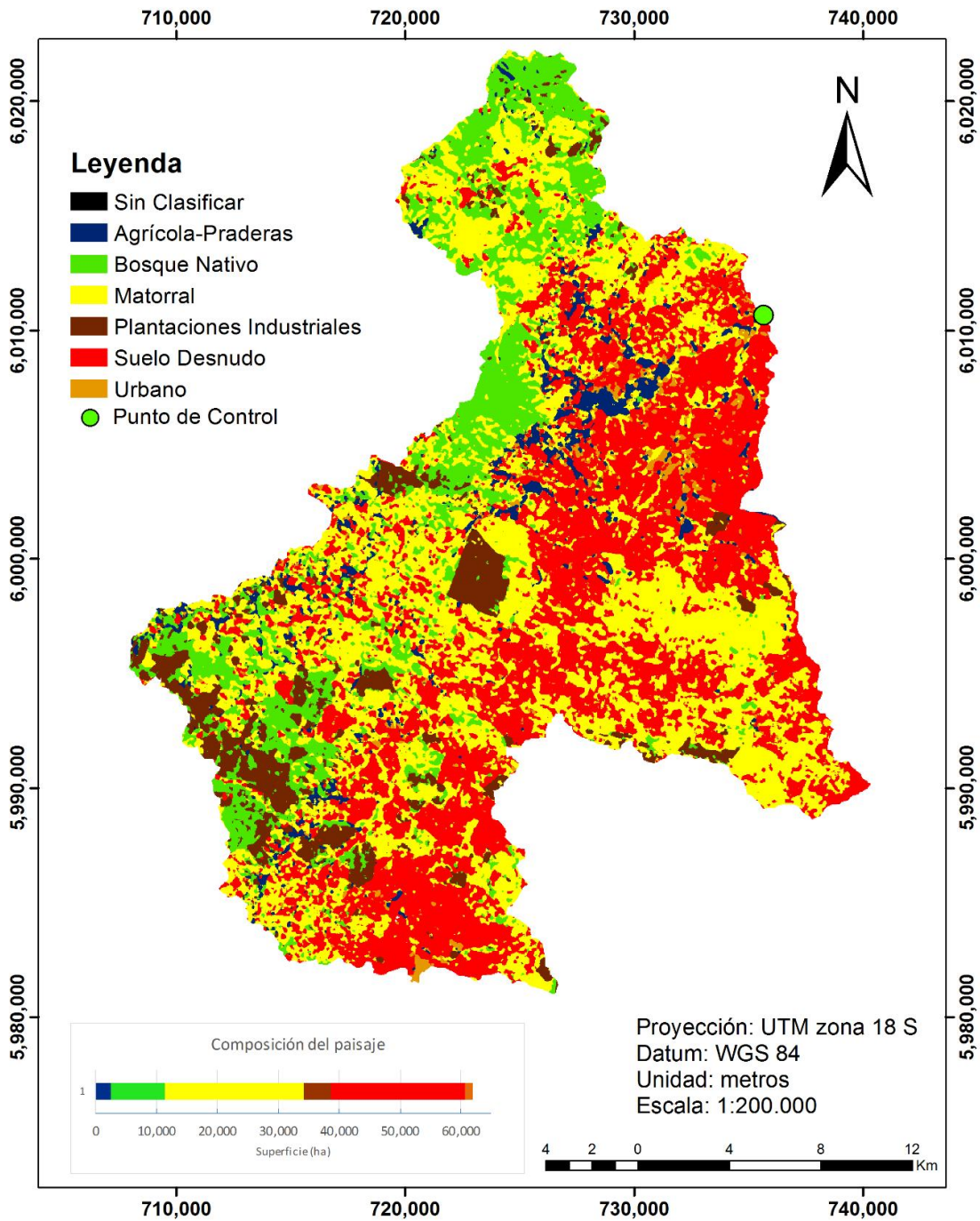
Anexo 2.b. Valores de los índices de estructura de paisaje en la cuenca de Cauquenes, para las 8 fechas del periodo 2000-2014 (valores adimensionales).

Año	NP	Área				LPI	Aislación			Complejidad de Forma de Parche							PAFRAC
		AREA MN	AREA AM	AREA MD	AREA CV		ENN MN	ENN AM	ENN CV	SHAPE MN	SHAPE AM	SHAPE CV	FRAC MN	FRAC MD	FRAC AM	FRAC CV	
2000-01	5.190	11,77	2.498,00	0,99	1.453%	17,3%	161,65	84,31	101%	1,343	6,793	47%	1,054	1,200	1,0472	4%	1,282
2001-02	4.337	14,21	4.254,63	0,90	1.727%	23,4%	175,22	82,01	113%	1,328	9,182	51%	1,052	1,218	1,0466	4%	1,276
2004-05	4.134	14,76	3.953,21	1,08	1.633%	19,8%	180,84	85,38	111%	1,336	9,465	51%	1,053	1,221	1,0472	4%	1,277
2005-06	4.274	14,36	4.354,28	1,17	1.738%	22,4%	174,55	97,72	95%	1,332	9,744	51%	1,053	1,217	1,0472	4%	1,270
2006-07	4.496	13,59	6.614,70	0,99	2.204%	31,1%	177,60	86,95	110%	1,324	11,849	49%	1,053	1,219	1,0472	4%	1,266
2008-09	5.885	10,39	2.336,88	0,81	1.497%	16,3%	155,45	89,49	96%	1,347	7,525	47%	1,055	1,205	1,048	4%	1,287
2010-11	3.984	15,26	4.042,62	1,08	1.625%	22,5%	184,52	83,76	112%	1,326	8,804	51%	1,052	1,215	1,045	4%	1,276
2013-14	5.951	10,10	1.729,64	0,81	1.305%	13,0%	152,92	85,39	99%	1,331	5,818	43%	1,053	1,183	1,0472	4%	1,278

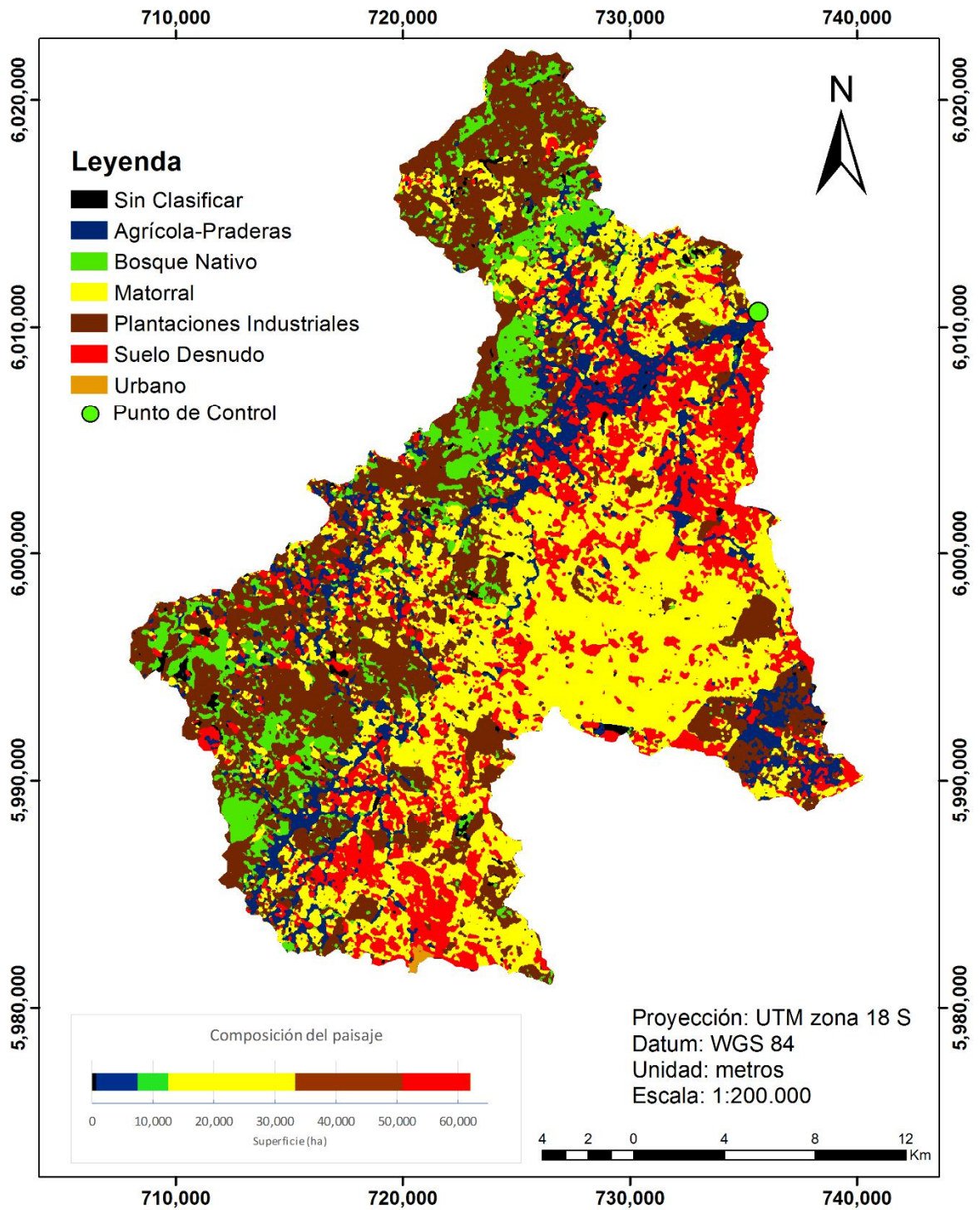
Anexo 2.c. Valores de los índices de estructura de paisaje en la cuenca de Purapel, para las 8 fechas del periodo 2000-2014 (valores adimensionales).

Año	NP	Área				LPI	Aislación			Complejidad de Forma de Parche							PAFRAC
		AREA MN	AREA AM	AREA MD	AREA CV		ENN MN	ENN AM	ENN CV	SHAPE MN	SHAPE AM	SHAPE CV	FRAC MN	FRAC MD	FRAC AM	FRAC CV	
2000-01	1.854	14,40	3.510,62	1,17	1.558%	32,8%	179,70	80,93	106%	1,353	6,942	45%	1,055	1,048	1,203	4%	1,284
2001-02	1.934	13,97	2.447,00	0,90	1.320%	26,5%	186,20	84,65	112%	1,333	6,903	49%	1,053	1,0472	1,206	4%	1,284
2004-05	1.970	13,58	1.484,55	0,90	1.041%	15,6%	178,01	85,09	104%	1,340	6,704	51%	1,053	1,0472	1,200	4%	1,281
2005-06	1.680	16,04	1.393,40	1,08	927%	13,0%	202,10	89,87	103%	1,337	6,409	50%	1,054	1,0477	1,197	4%	1,267
2006-07	1.732	15,36	1.160,25	0,99	863%	12,9%	191,75	91,88	107%	1,345	6,017	52%	1,053	1,0472	1,194	4%	1,276
2008-09	2.433	11,11	804,48	0,81	845%	11,2%	165,60	84,52	91%	1,356	6,147	51%	1,056	1,0483	1,197	4%	1,287
2010-11	2.253	11,95	1.268,81	0,99	1.025%	17,5%	167,49	85,92	97%	1,353	6,562	50%	1,055	1,0477	1,195	4%	1,282
2013-14	2.100	12,65	3.413,62	0,99	1.640%	34,0%	173,74	90,03	97%	1,333	9,950	51%	1,053	1,0472	1,215	4%	1,273

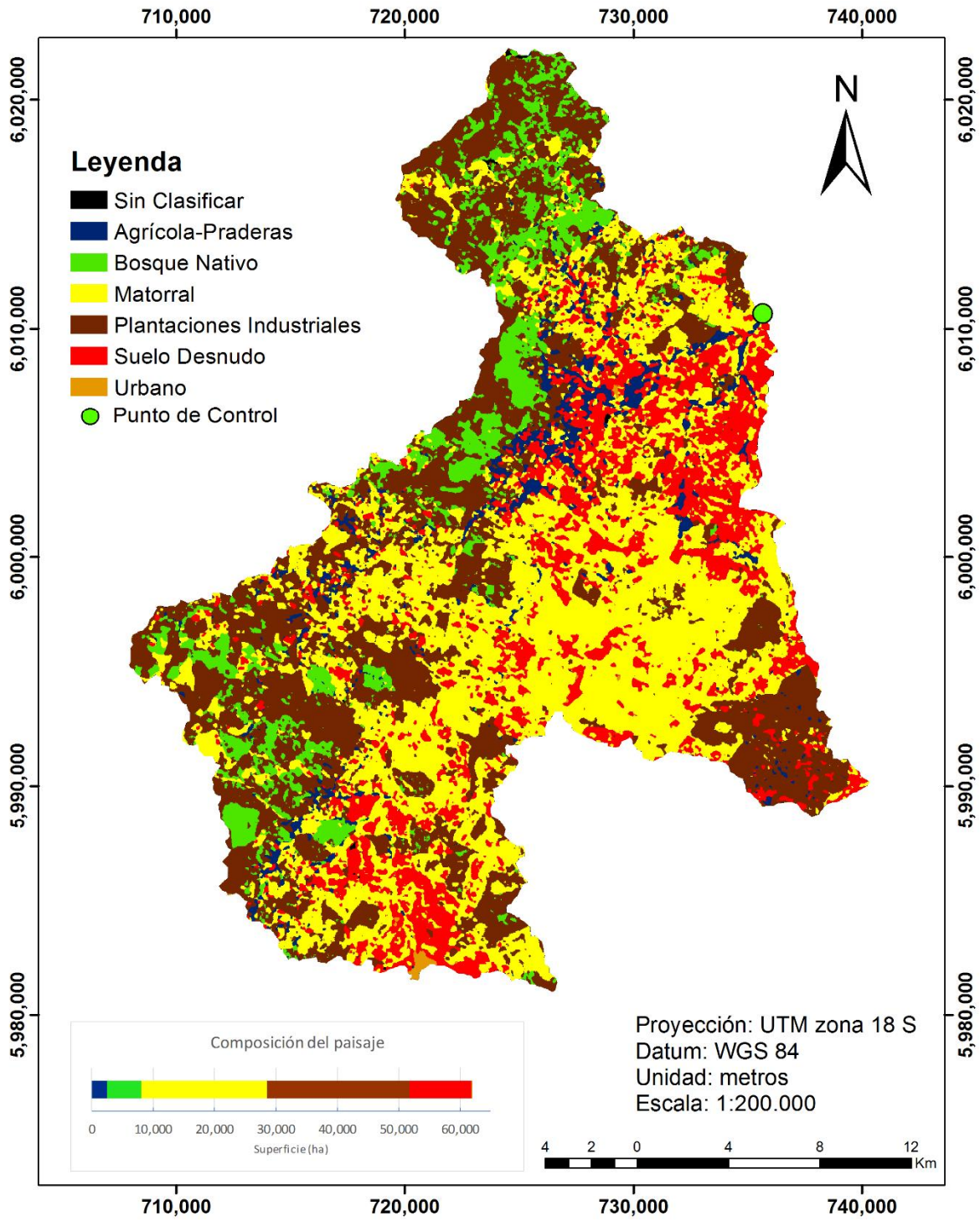
Anexo 3.a Cobertura de suelo en Cauquenes temporada 1985-86



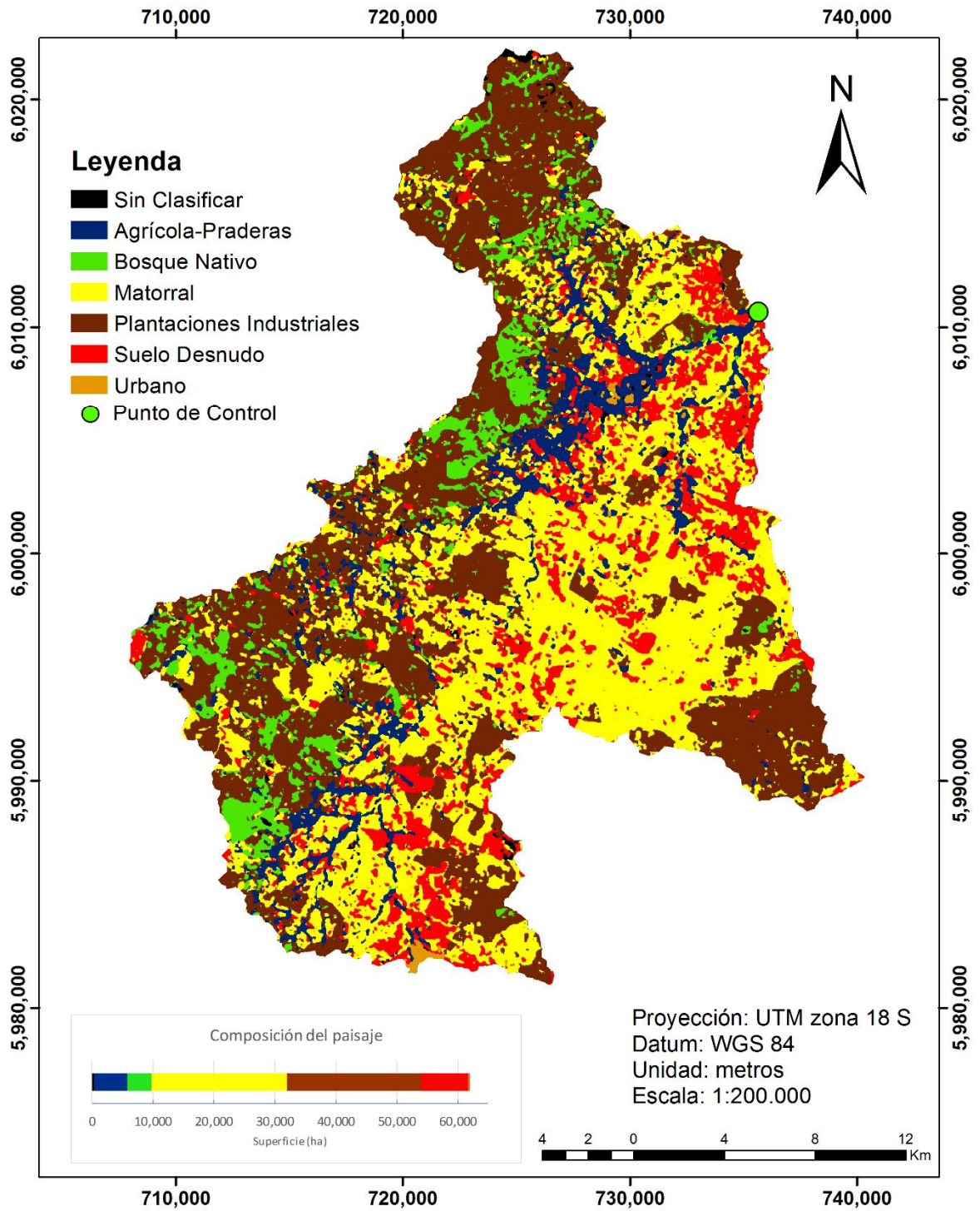
Anexo 3.b Cobertura de suelo en Cauquenes temporada 2000-01



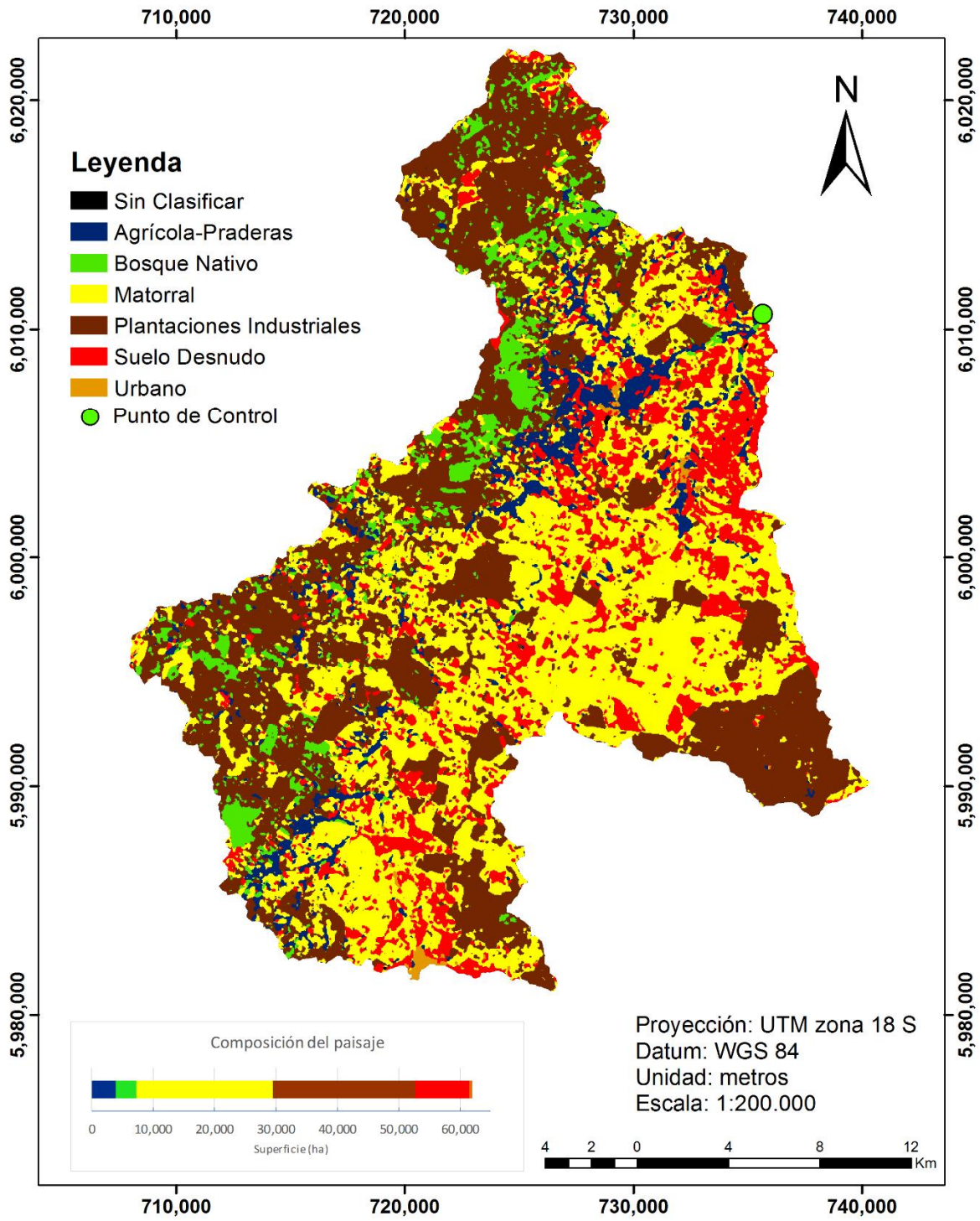
Anexo 3.b Cobertura de suelo en Cauquenes temporada 2001-02



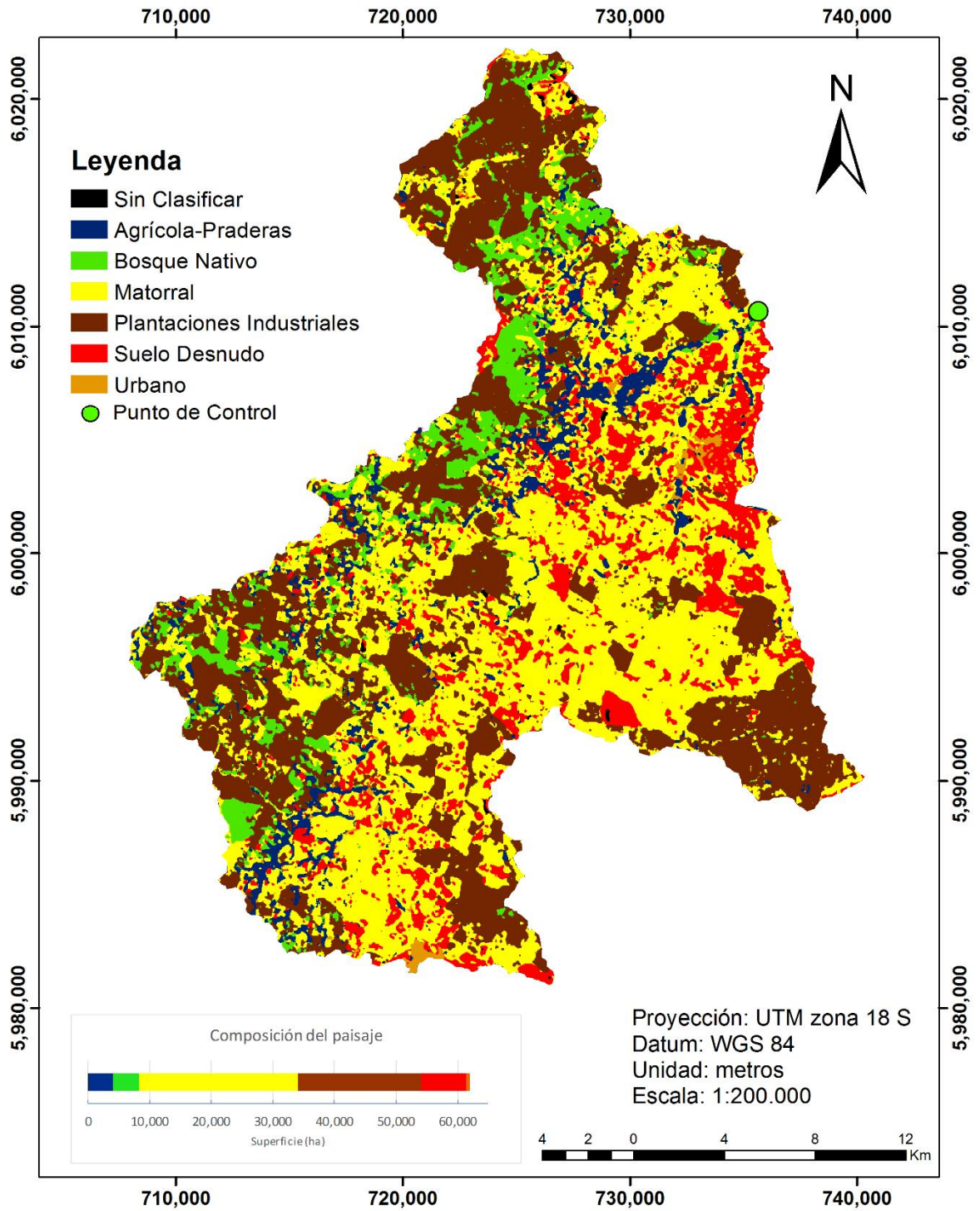
Anexo 3.c Cobertura de suelo en Cauquenes temporada 2004-05



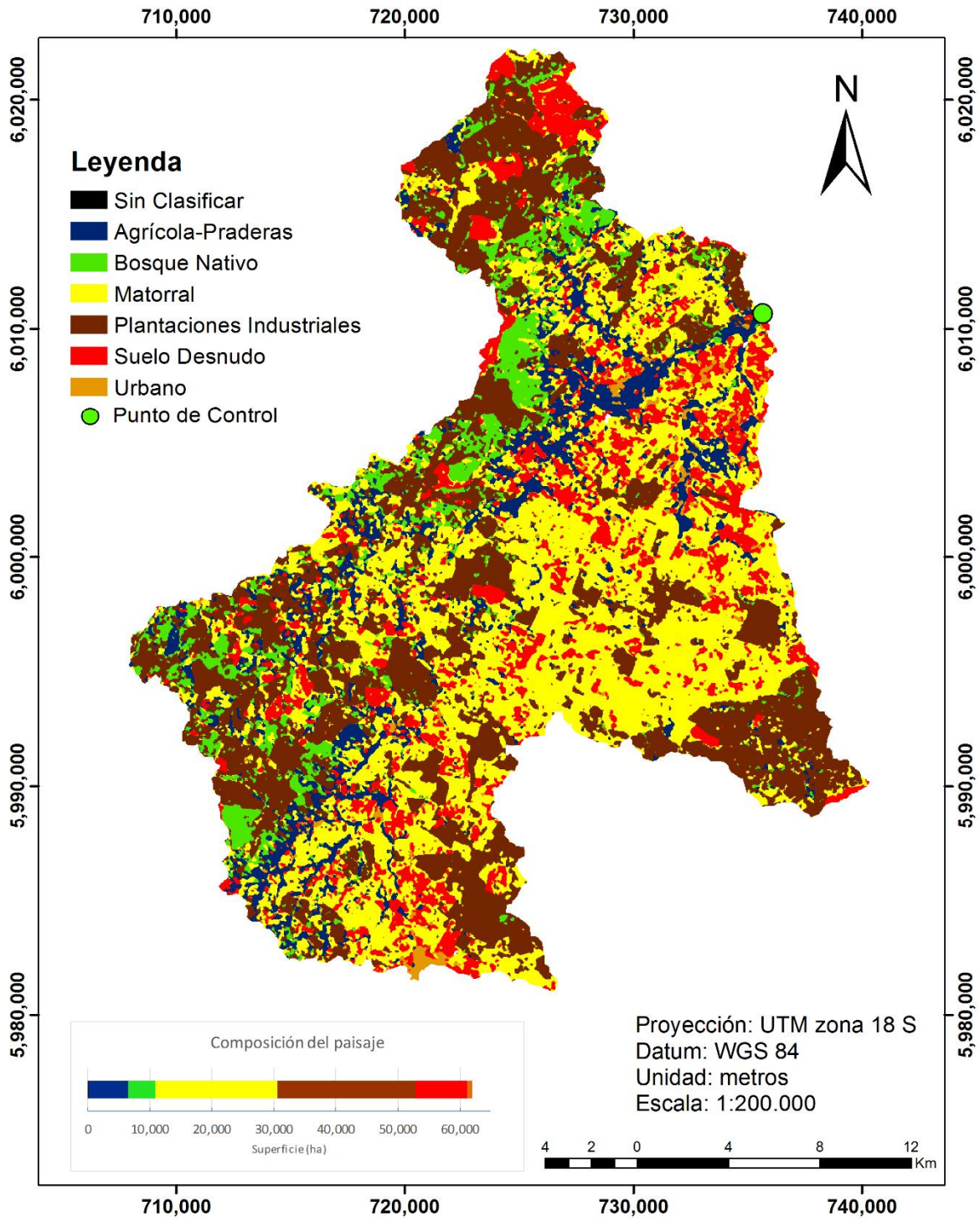
Anexo 3.d Cobertura de suelo en Cauquenes temporada 2005-06



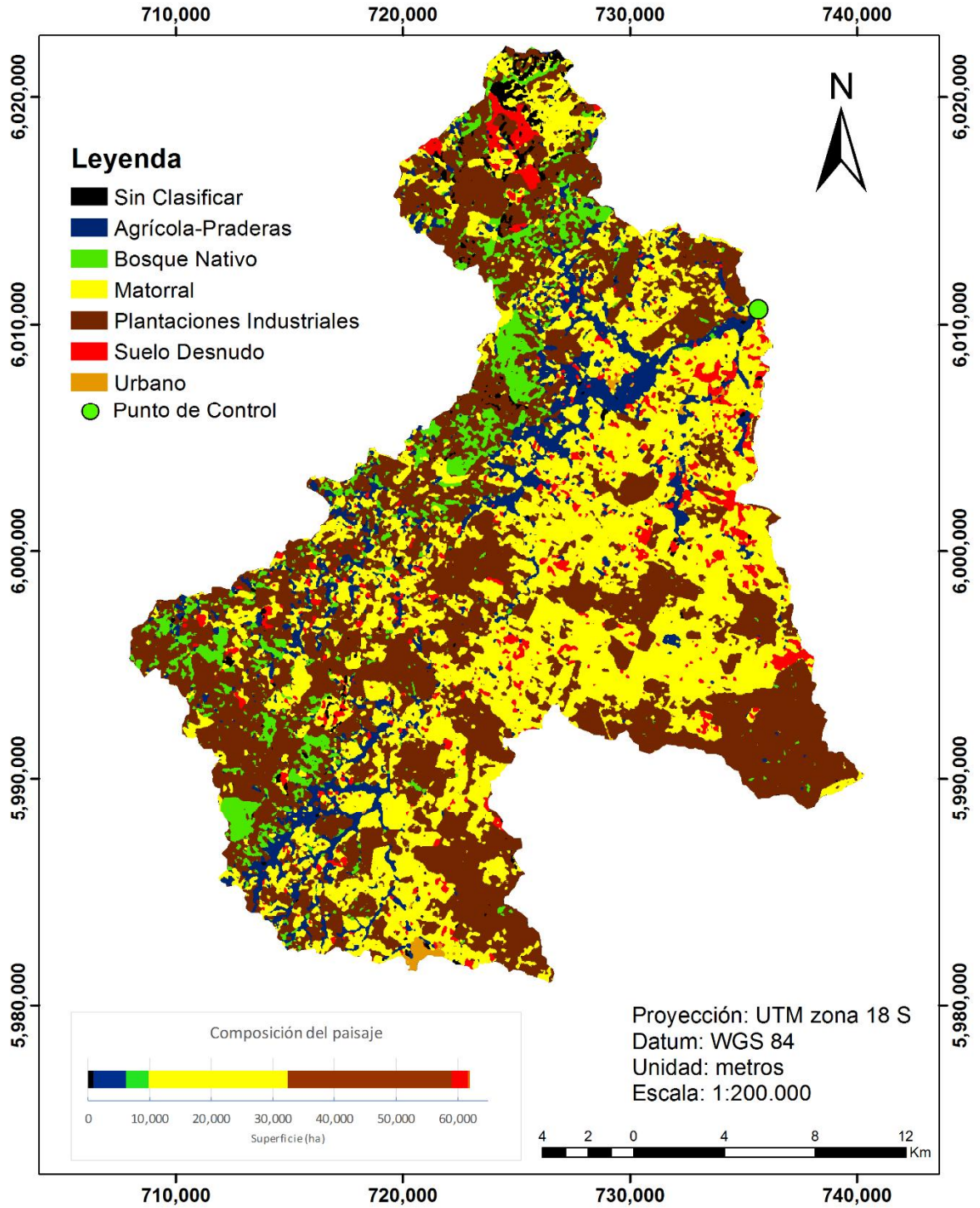
Anexo 3.e Cobertura de suelo en Cauquenes temporada 2006-07



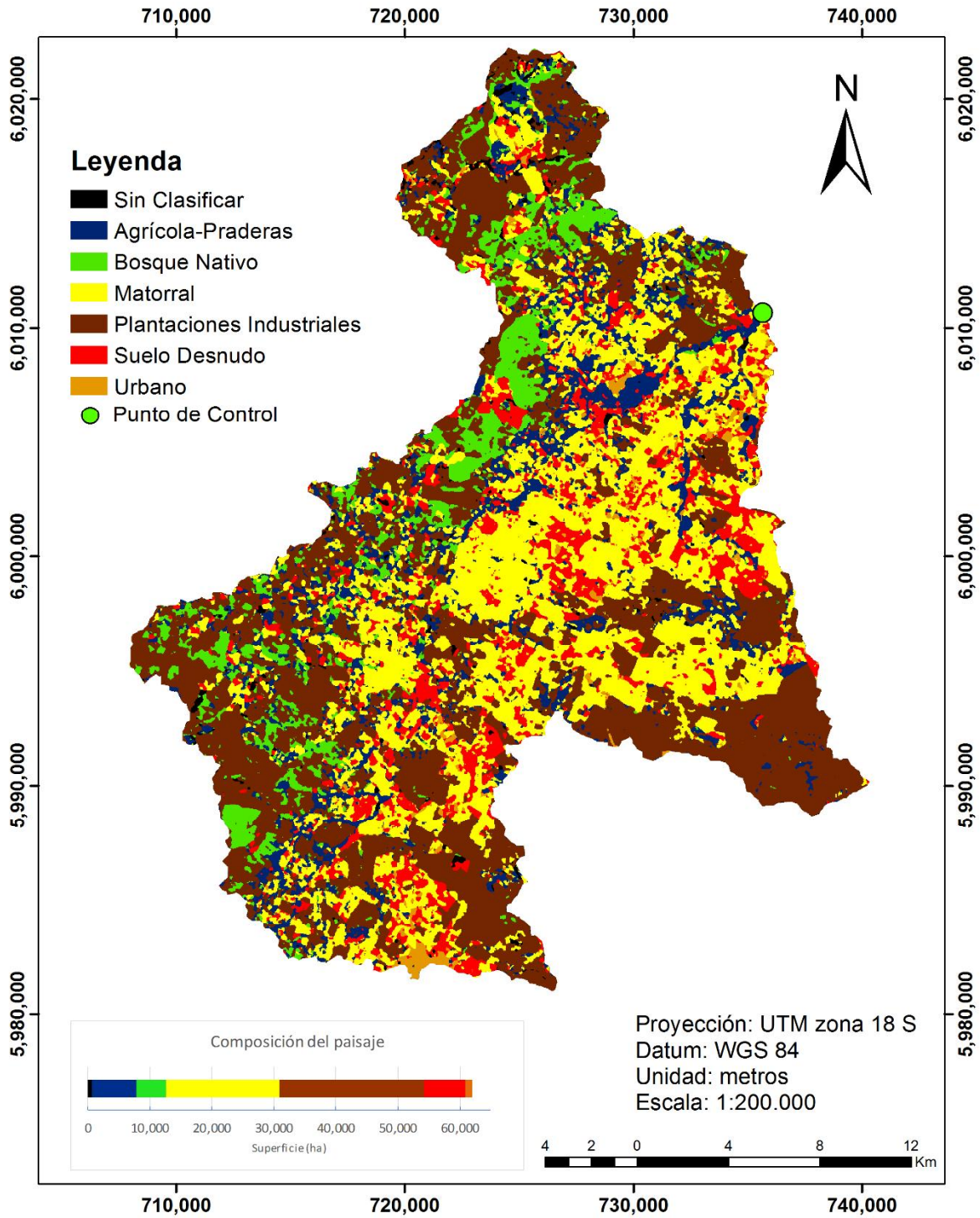
Anexo 3.f Cobertura de suelo en Cauquenes temporada 2008-09



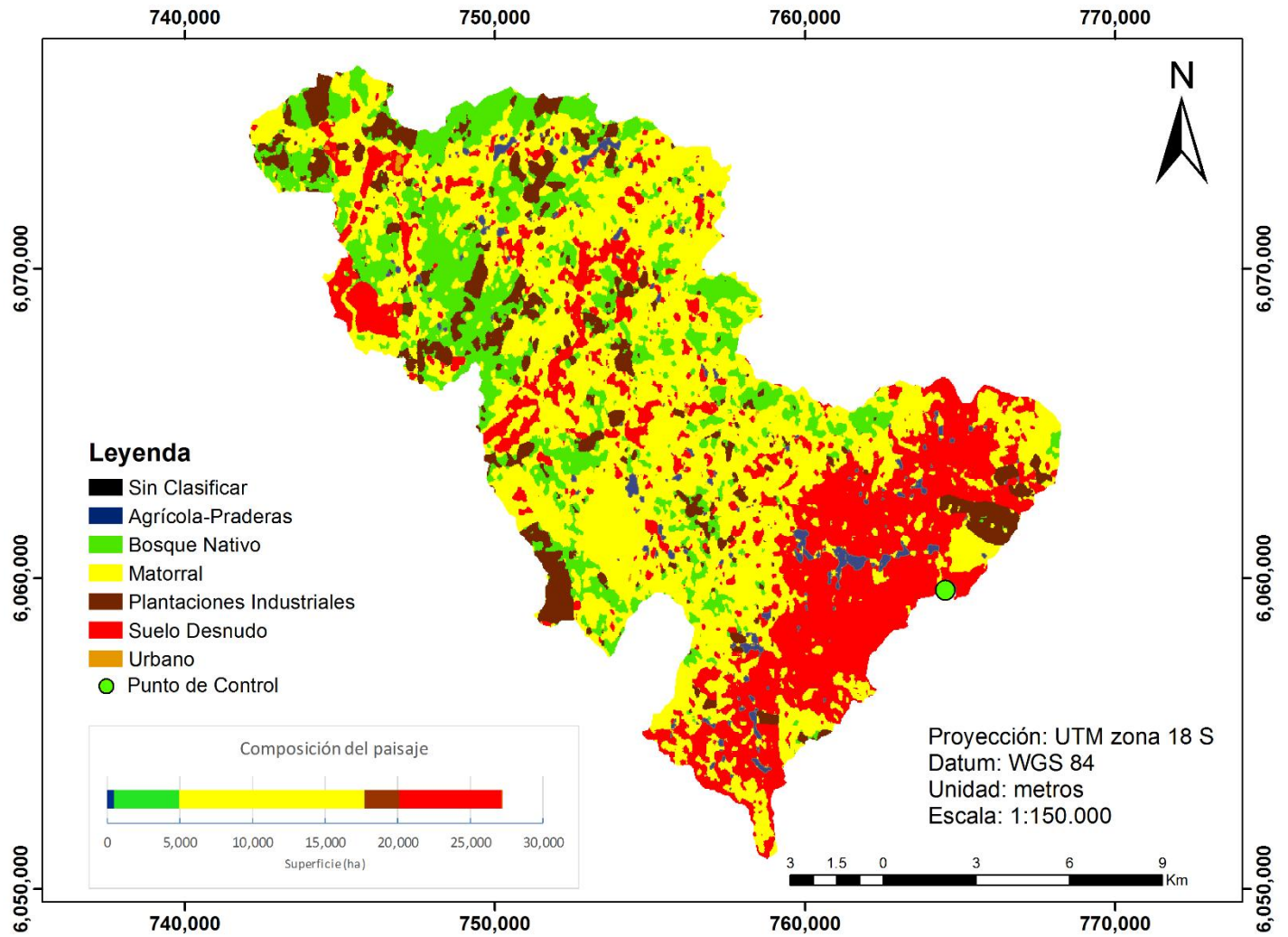
Anexo 3.g Cobertura de suelo en Cauquenes temporada 2010-11



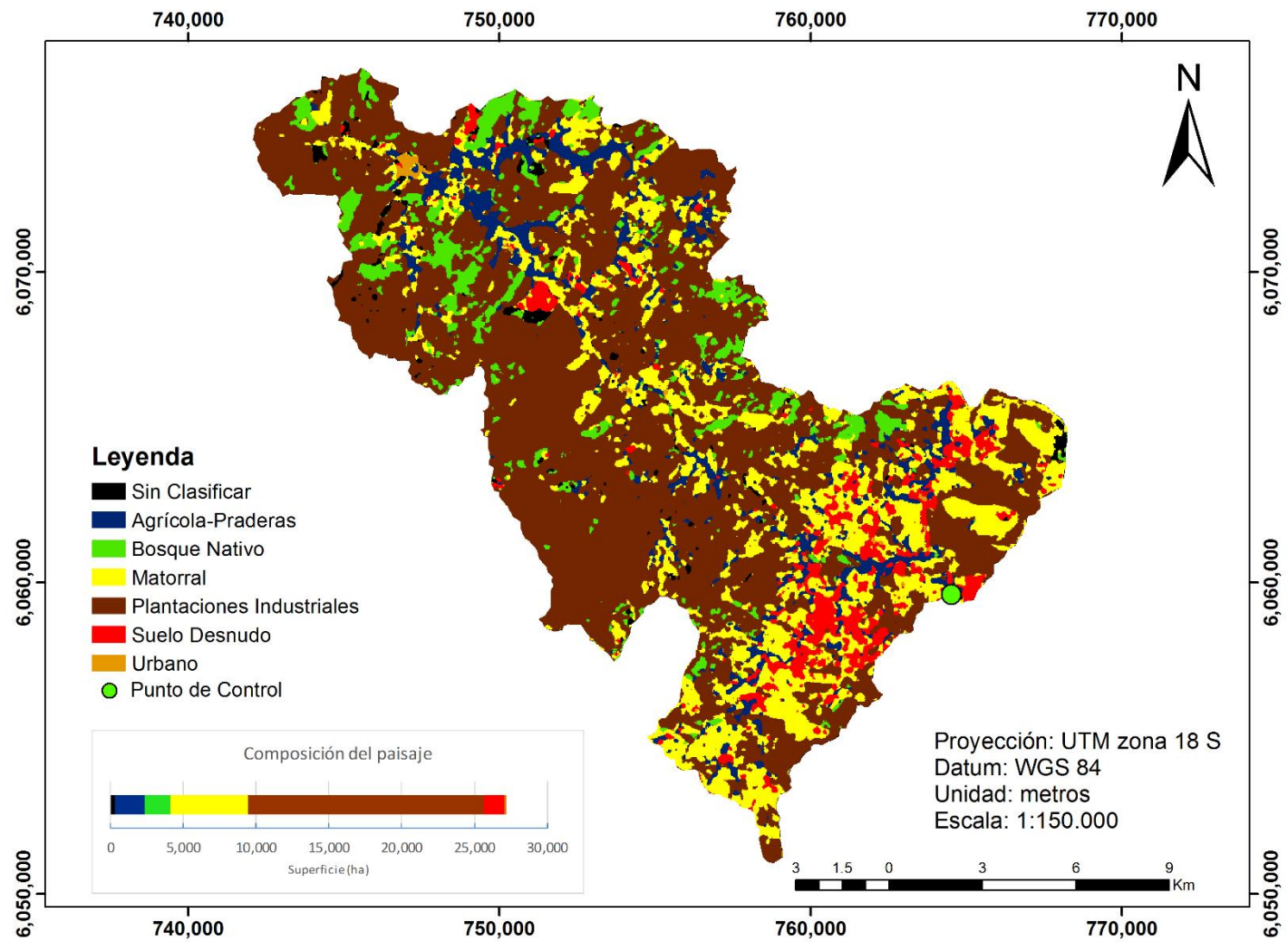
Anexo 3.h Cobertura de suelo en Cauquenes temporada 2013-14



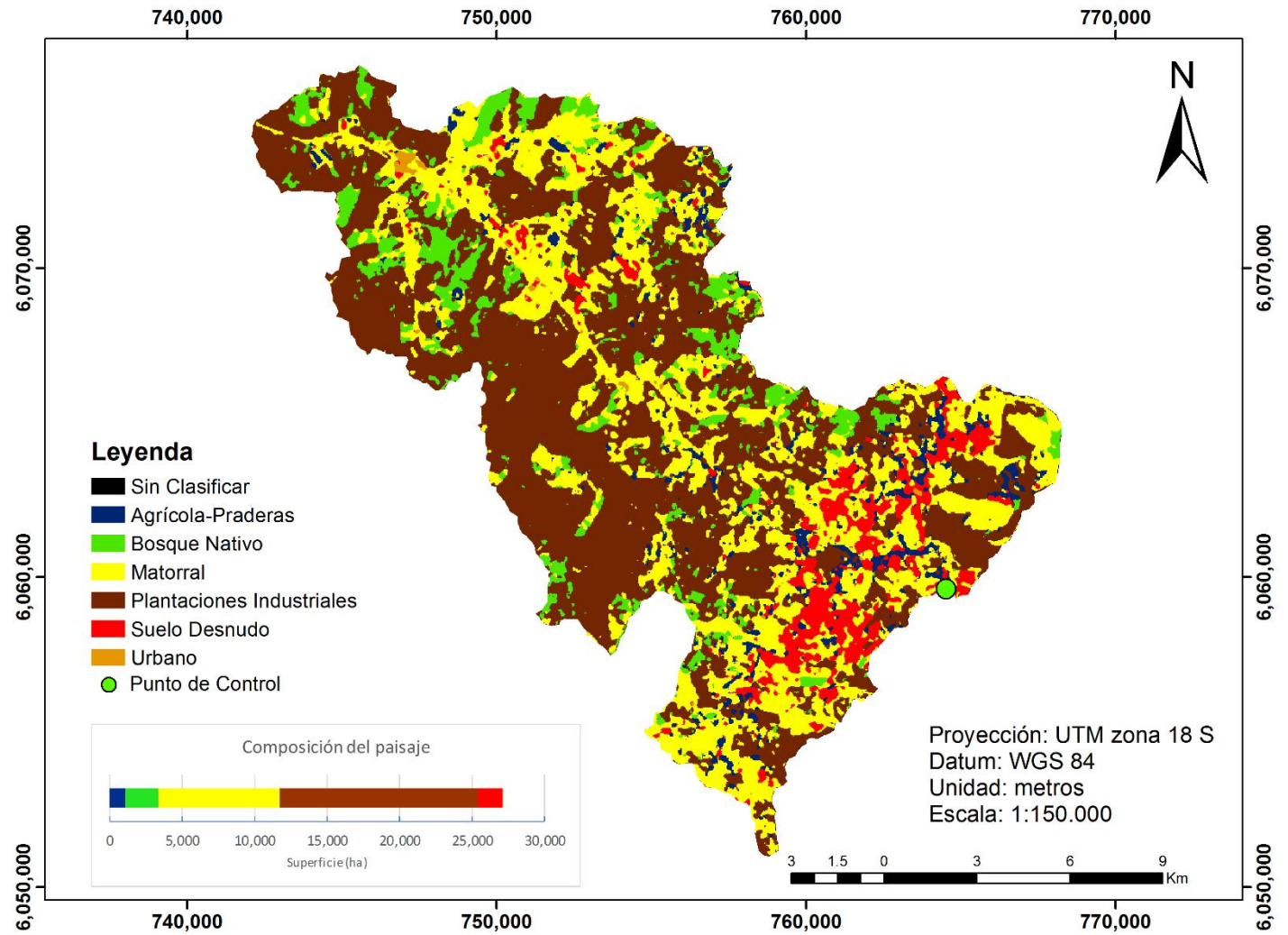
Anexo 3.i Cobertura de suelo en Purapel temporada 1985-86



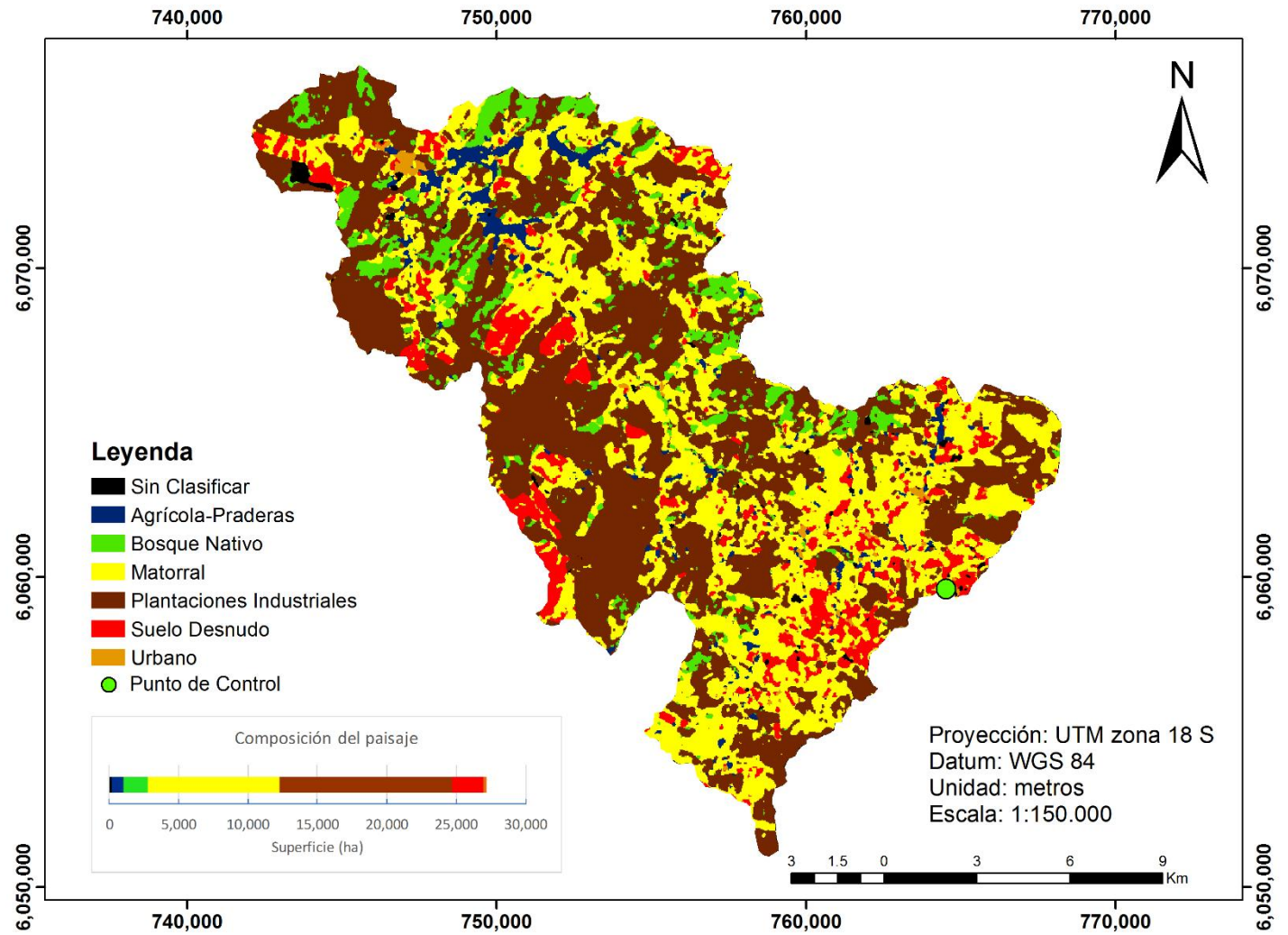
Anexo 3.j Cobertura de suelo en Purapel temporada 2000-01



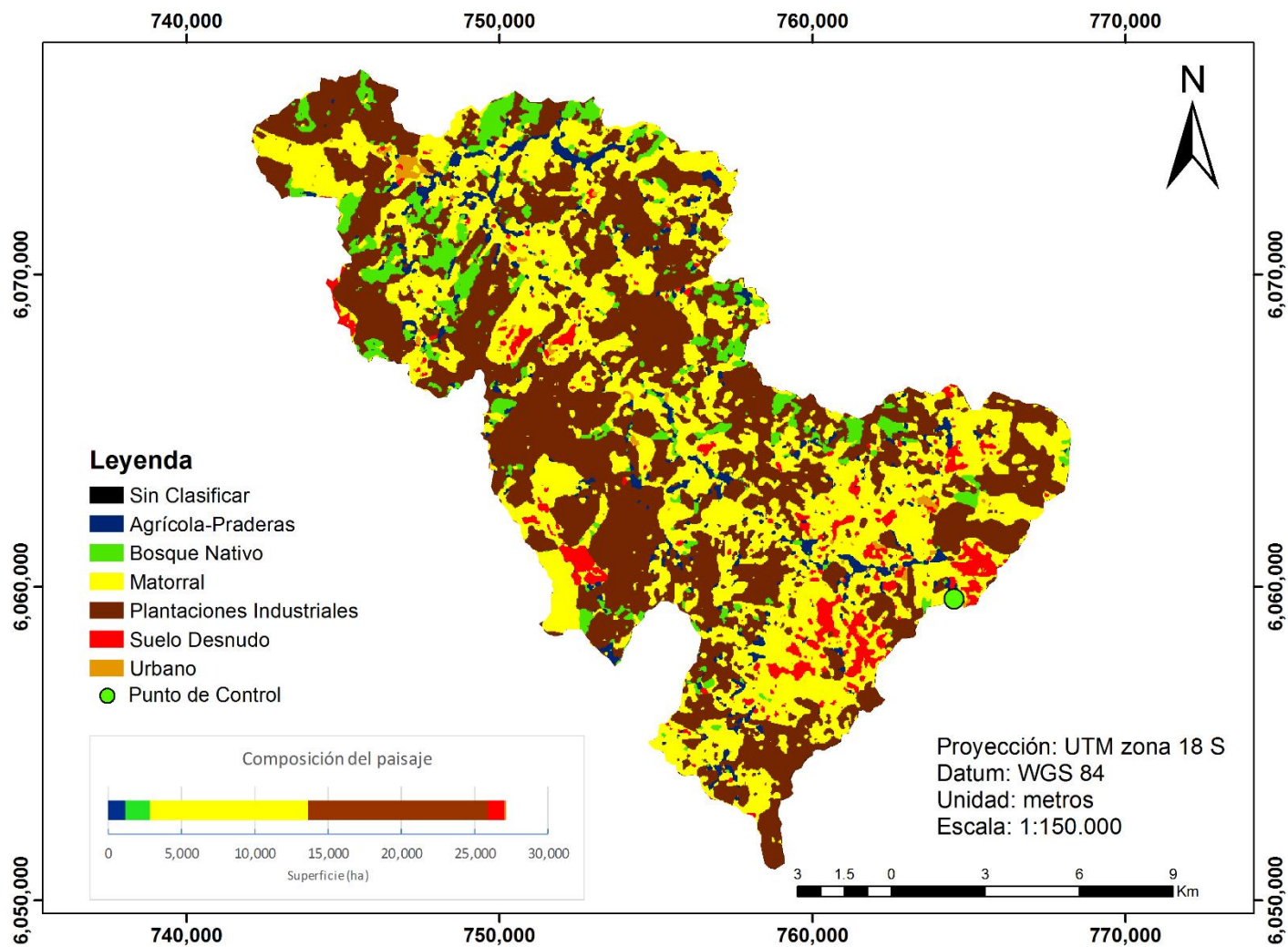
Anexo 3.k Cobertura de suelo en Purapel temporada 2001-02



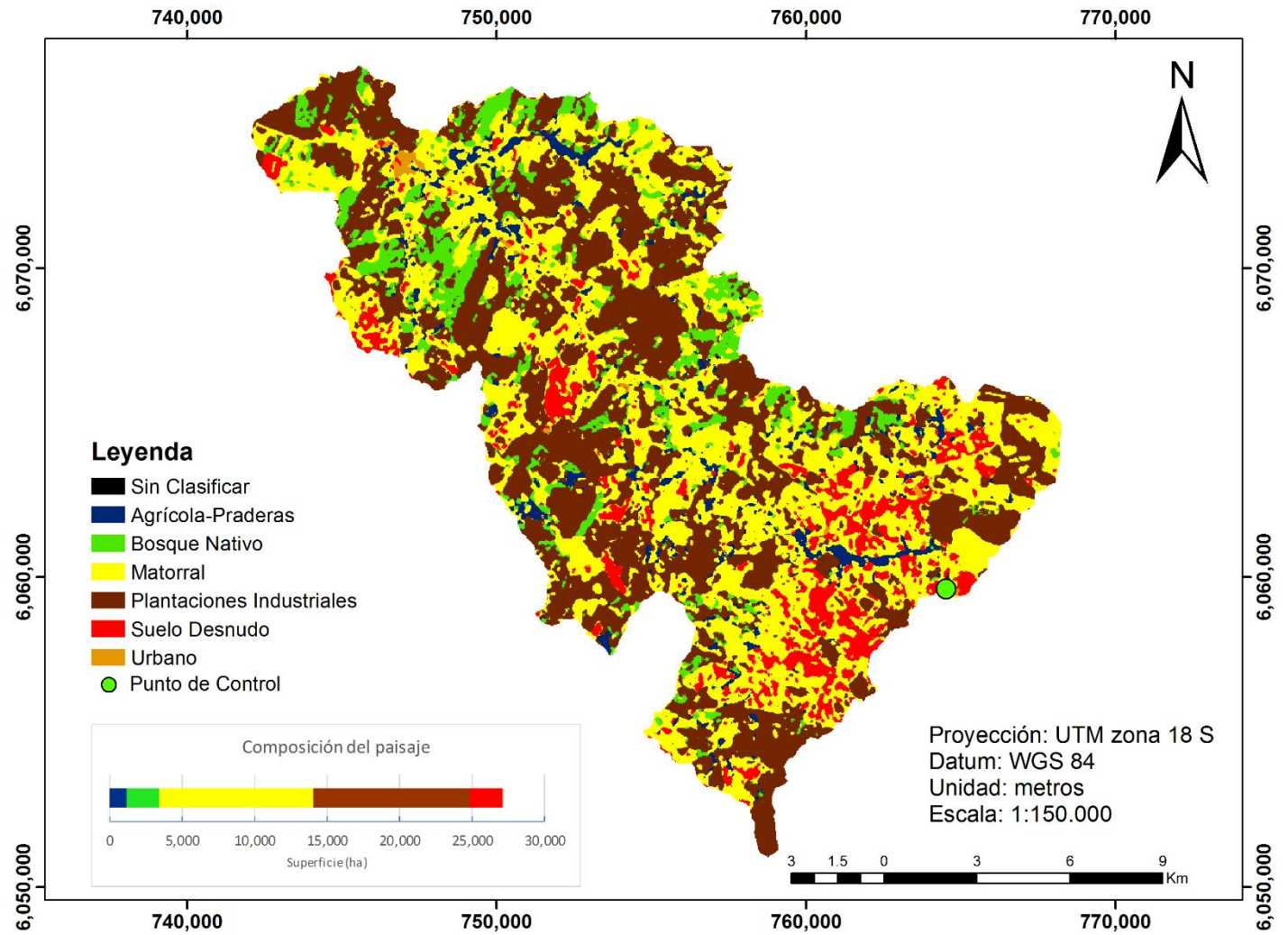
Anexo 3.1 Cobertura de suelo en Purapel temporada 2004-05



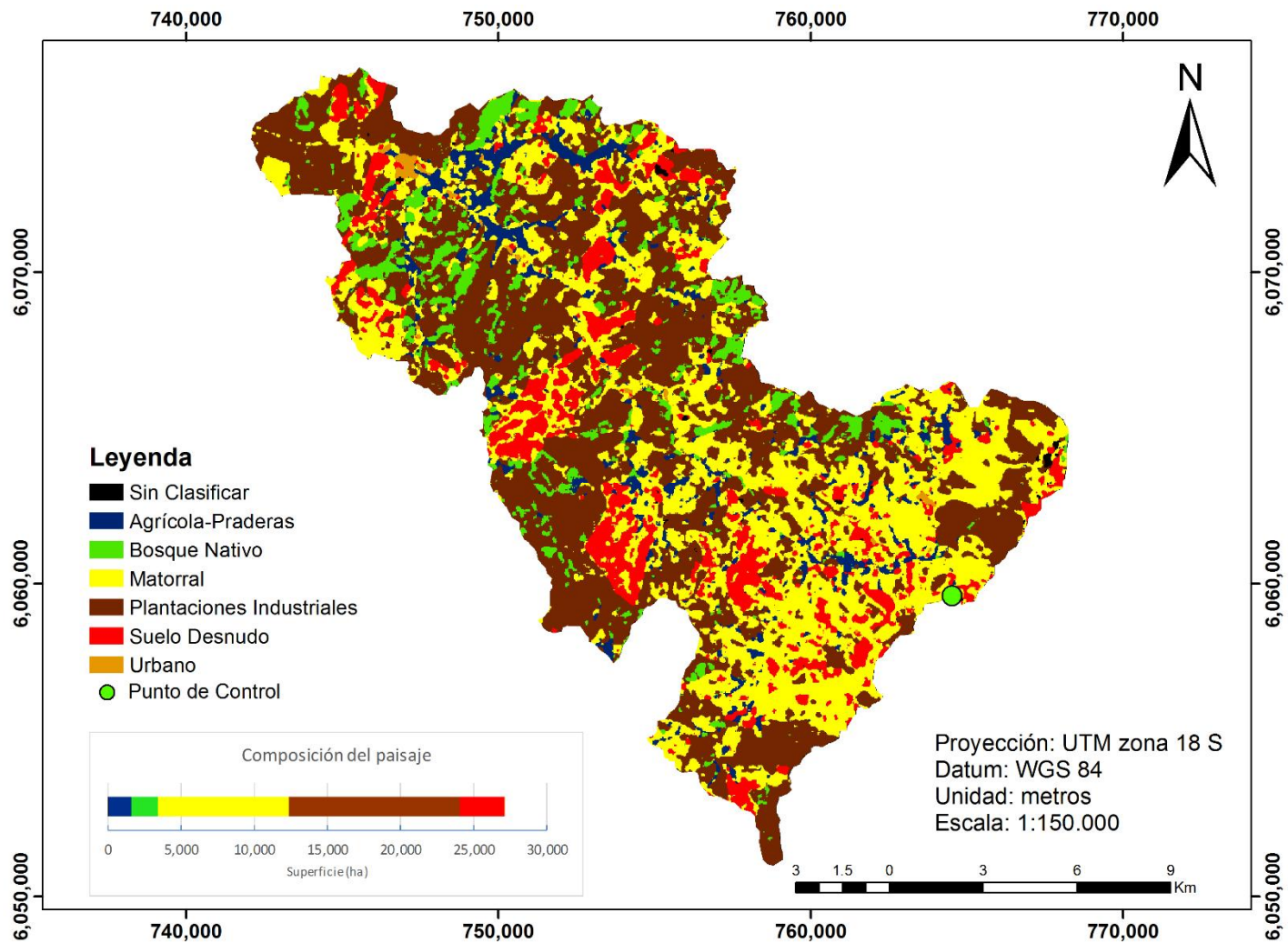
Anexo 3.m Cobertura de suelo en Purapel temporada 2005-06



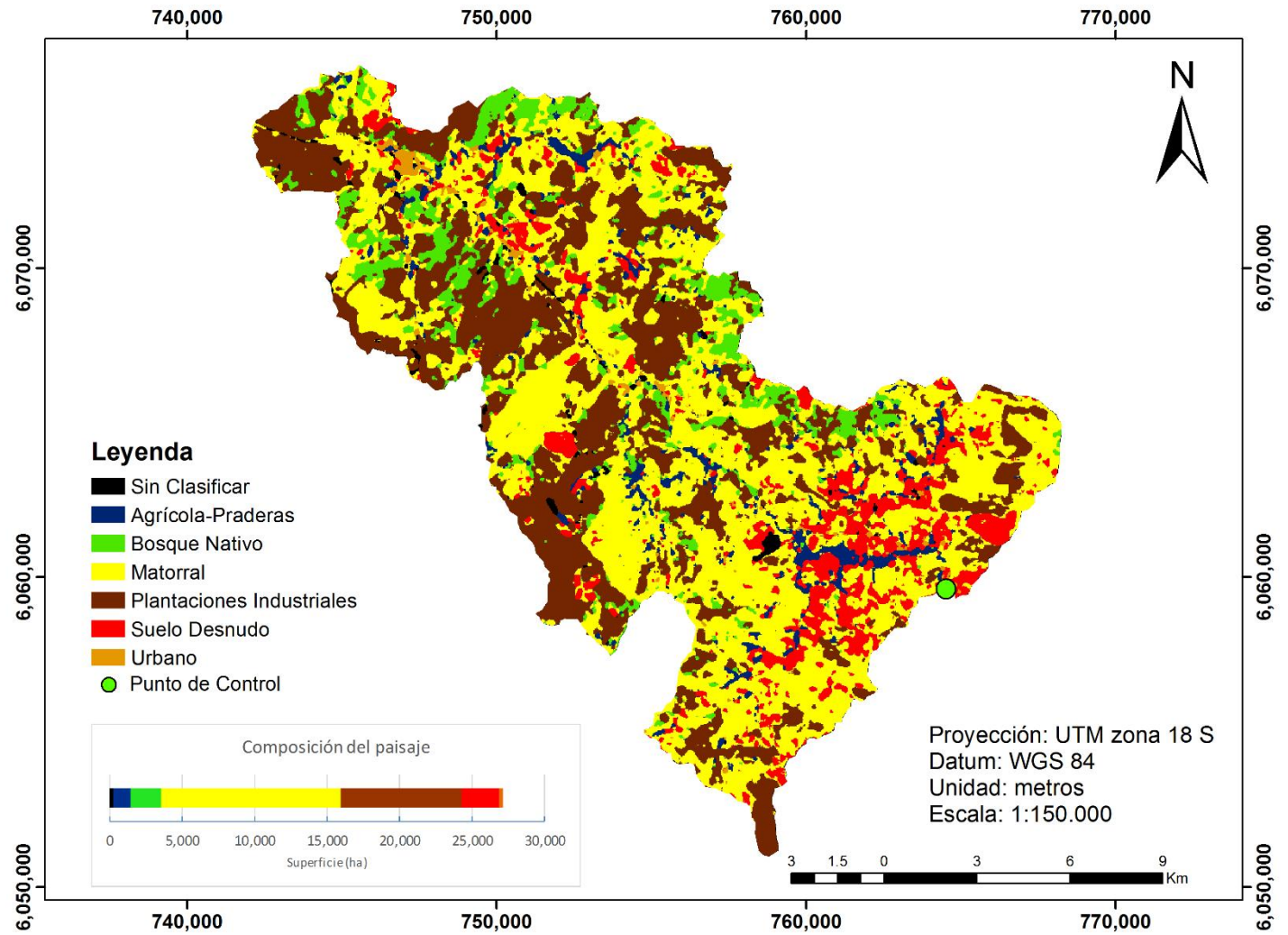
Anexo 3.n Cobertura de suelo en Purapel temporada 2008-09



Anexo 3.o Cobertura de suelo en Purapel temporada 2010-11



Anexo 3.q Cobertura de suelo en Purapel temporada 2013-14



Anexo 4.a. Separabilidad espectral de clases entre los pares Bosque Nativo – Pino (B-P), Bosque Nativo – Eucalipto (B-Eu) y Pino-Eucalipto (P-Eu) en Cauquenes y Purapel, para la temporada 1985-86 y el periodo 2000-01 a 2013-14.

Cuenca	Temporada	B – P	B – Eu	P-Eu
Purapel	1985-86	1,963	-	-
	2000-01	1,964	-	-
	2001-02	1,953	-	-
	2004-05	1,804	-	-
	2005-06	1.876	-	-
	2006-07	1.863	-	-
	2008-09	1,828	-	-
	2010-11	1,788	-	-
	2013-14	1,965	-	-
Cauquenes	1985-86	1,771	-	-
	2000-01	1,885	1,943	1,602
	2001-02	1,910	1,968	1,705
	2004-05	1,837	1,739	1,293
	2005-06	1.804	1.889	1.434
	2006-07	1.860	1.942	1.472
	2008-09	1,849	1,988	1,883
	2010-11	1,788	1,893	1,655
	2013-14	1,985	1,993	1,93

Anexo 4.b. Exactitudes del productor (PA) y usuario (UA) para las clases Pino, Eucaliptus, Bosque Nativo y Matorrales en la Cuenca de Cauquenes desde 1985-86, 2000-01 a 2013-14.

Clase	1985-86		2000-01		2001-02		2004-05		2005-06		2006-07		2008-09		2010-11		2013-14	
	PA	UA	PA	UA	PA	UA	PA	UA	PA	UA	PA	UA	PA	UA	PA	UA	PA	UA
B	99%	83%	100%	90%	99%	79%	100%	91%	100%	100%	100%	95%	100%	100%	90%	100%	95%	97%
M	64%	100%	95%	94%	93%	88%	100%	100%	100%	100%	100%	83%	85%	83%	97%	92%	90%	99%
P	80%	99%	75%	89%	71%	100%	82%	100%	100%	100%	94%	100%	100%	100%	96%	85%	97%	95%

Anexo 4.c. Exactitudes del productor (PA) y usuario (UA) para las clases Pino, Eucaliptus, Bosque Nativo y Matorrales en la Cuenca de Purapel desde 1985-86, 2000-01 a 2013-14.

Clase	1985-86		2000-01		2001-02		2004-05		2005-06		2006-07		2008-09		2010-11		2013-14	
	PA	UA	PA	UA	PA	UA	PA	UA	PA	UA	PA	UA	PA	UA	PA	UA	PA	UA
B	100%	90%	91%	100%	100%	100%	94%	100%	99%	85%	92%	100%	99%	100%	100%	100%	98%	91%
M	100%	77%	99%	100%	100%	60%	92%	84%	100%	92%	87%	93%	78%	100%	93%	90%	98%	92%
P	89%	100%	100%	95%	100%	100%	91%	99%	84%	100%	100	98%	100%	100%	100%	100%	86%	97%

Anexo 5.a. Composición general del paisaje en el periodo 2000-2014 en la cuenca de Cauquenes (expresado en ha)

Clase	1985-86	2000-01	2001-02	2004-05	2005-06	2006-07	2008-09	2010-11	2013-14	Media	Desv. Estándar	Coef. De Variación	r ¹⁹⁸⁶⁻²⁰⁰¹ (%)	r ²⁰⁰¹⁻²⁰¹⁴ (%)	r ¹⁹⁸⁶⁻²⁰¹⁴ (%)
Sin Clasificar	2	660	46	450	16	141	19	837	707	359	343	95,63%	39,03%	0,54%	39,50%
Agrícola-Praderas (AP)	2.498	6.781	2.528	5.253	3.901	3.949	6.460	5.418	7.104	5.216	1.610	30,87%	6,66%	0,36%	6,97%
Bosque Nativo (B)	8.858	5.139	5.542	4.031	3.378	4.277	4.502	3.640	4.713	4.240	730	17,22%	-3,63%	-0,66%	-4,21%
Matorral (M)	22.872	20.727	20.491	22.148	22.192	25.742	19.585	22.558	18.293	21.406	2.254	10,53%	-0,66%	-0,96%	-1,49%
Plantaciones Industriales (P)	4.488	17.490	23.212	22.097	23.150	19.904	22.185	26.635	23.355	22.910	2.682	11,71%	9,07%	2,22%	11,00%
Suelo Desnudo (SD)	21.992	11.066	9.984	7.606	8.883	7.336	8.391	2.642	6.746	7.424	2.533	34,12%	-4,58%	-3,81%	-7,88%
Urbano (U)	1.229	76	135	353	418	590	797	208	1.016	419	331	79,07%	-18,57%	19,97%	-1,27%

Anexo 5.b. Composición general del paisaje en el periodo 2000-2014 en la cuenca de Cauquenes (expresado en porcentaje de la superficie total de la cuenca)

Clase	1985-86	2000-01	2001-02	2004-05	2005-06	2006-07	2008-09	2010-11	2013-14	Media	Desv. Estándar	Coef. De Variación
Sin Clasificar	0%	1%	0%	1%	0%	0%	0%	1%	1%	1%	1%	96%
Agrícola-Praderas (AP)	4%	11%	4%	8%	6%	6%	10%	9%	11%	8%	3%	31%
Bosque Nativo (B)	14%	8%	9%	7%	5%	7%	7%	6%	8%	7%	1%	17%
Matorral (M)	7%	28%	37%	36%	37%	32%	36%	43%	38%	36%	4%	12%
Plantaciones Industriales (P)	37%	33%	33%	36%	36%	42%	32%	36%	30%	35%	4%	11%
Suelo Desnudo (SD)	36%	18%	16%	12%	14%	12%	14%	4%	11%	7.424	2.533	34,12%
Urbano (U)	2%	0%	0%	1%	1%	1%	1%	0%	2%	419	331	79,07%

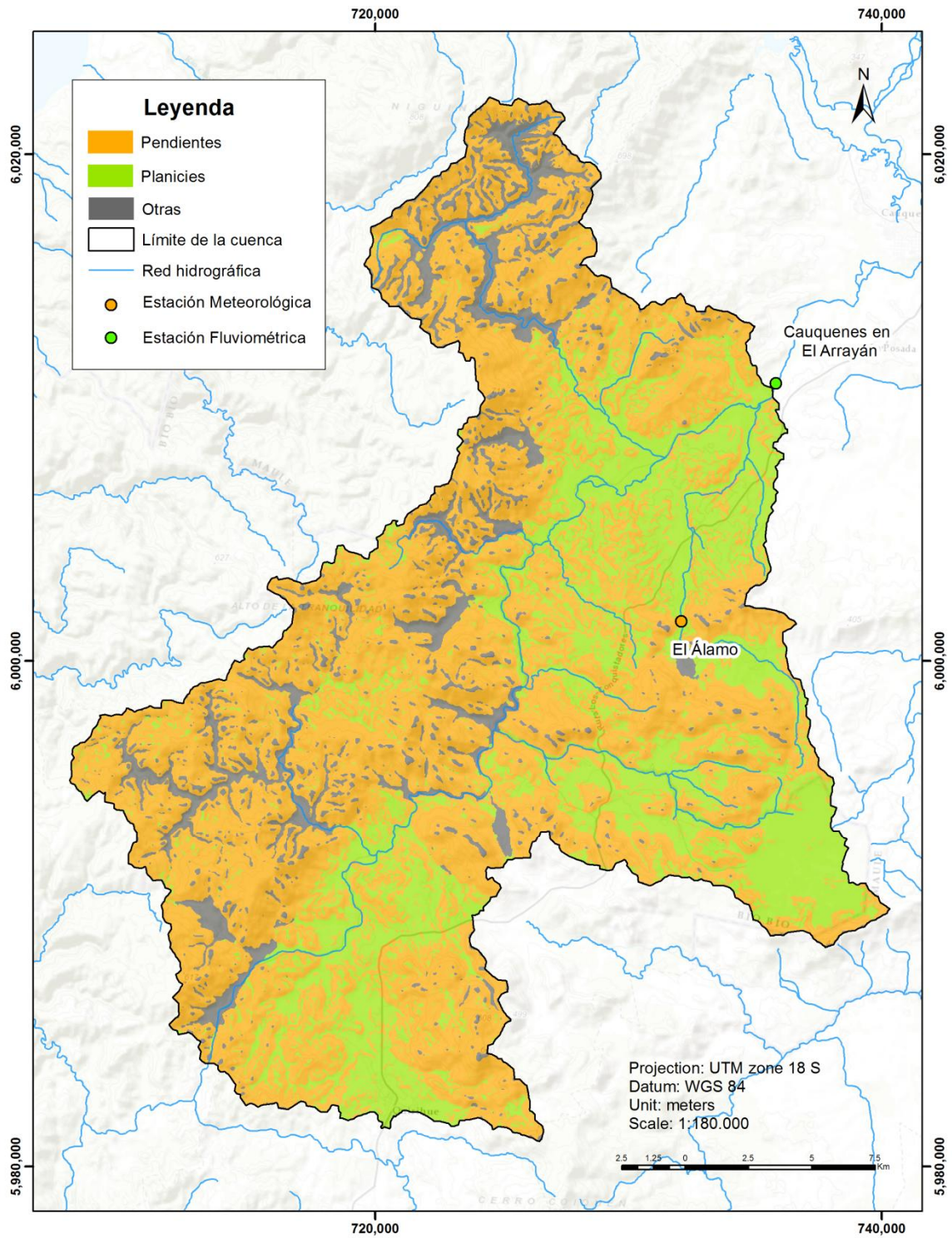
Anexo 5.c. Composición general del paisaje en el periodo 2000-2014 en la cuenca de Purapel (expresado en ha)

Clase	1985-86	2000-01	2001-02	2004-05	2005-06	2006-07	2008-09	2010-11	2013-14	Media	Desv. Estándar	Coef. De Variación	r ₁₉₈₆₋₂₀₀₁	r ₂₀₀₁₋₂₀₁₄	r ₁₉₈₆₋₂₀₁₄
Sin Clasificar	3	329	1	182	0	343	1	59	257	147	150	102,01%	31,58%	-1,89%	29,94%
Agrícola-Praderas (AP)	457	2.046	1.064	813	1.153	836	1.148	1.533	1.161	1.219	402	32,97%	9,99%	-4,36%	6,21%
Bosque Nativo (B)	4.492	1.747	2.271	1.773	1.707	1.407	2.248	1.811	2.118	1.885	300	15,94%	-6,29%	1,48%	-5,01%
Matorral (M)	12.751	5.329	8.353	9.485	10.739	10.366	10.631	8.965	12.393	9.533	2.102	22,05%	-5,82%	6,49%	-0,19%
Plantaciones Industriales (P)	2.375	16.155	13.662	12.437	12.287	12.245	10.785	11.682	8.339	12.199	2.237	18,34%	12,78%	-5,09%	8,37%
Suelo Desnudo (SD)	7.038	1.448	1.707	2.281	1.094	1.782	2.220	2.974	2.588	2.012	619	30,75%	-10,54%	4,47%	-6,67%
Urbano (U)	34	97	93	179	170	173	119	127	294	157	65	41,74%	6,95%	8,56%	14,37%

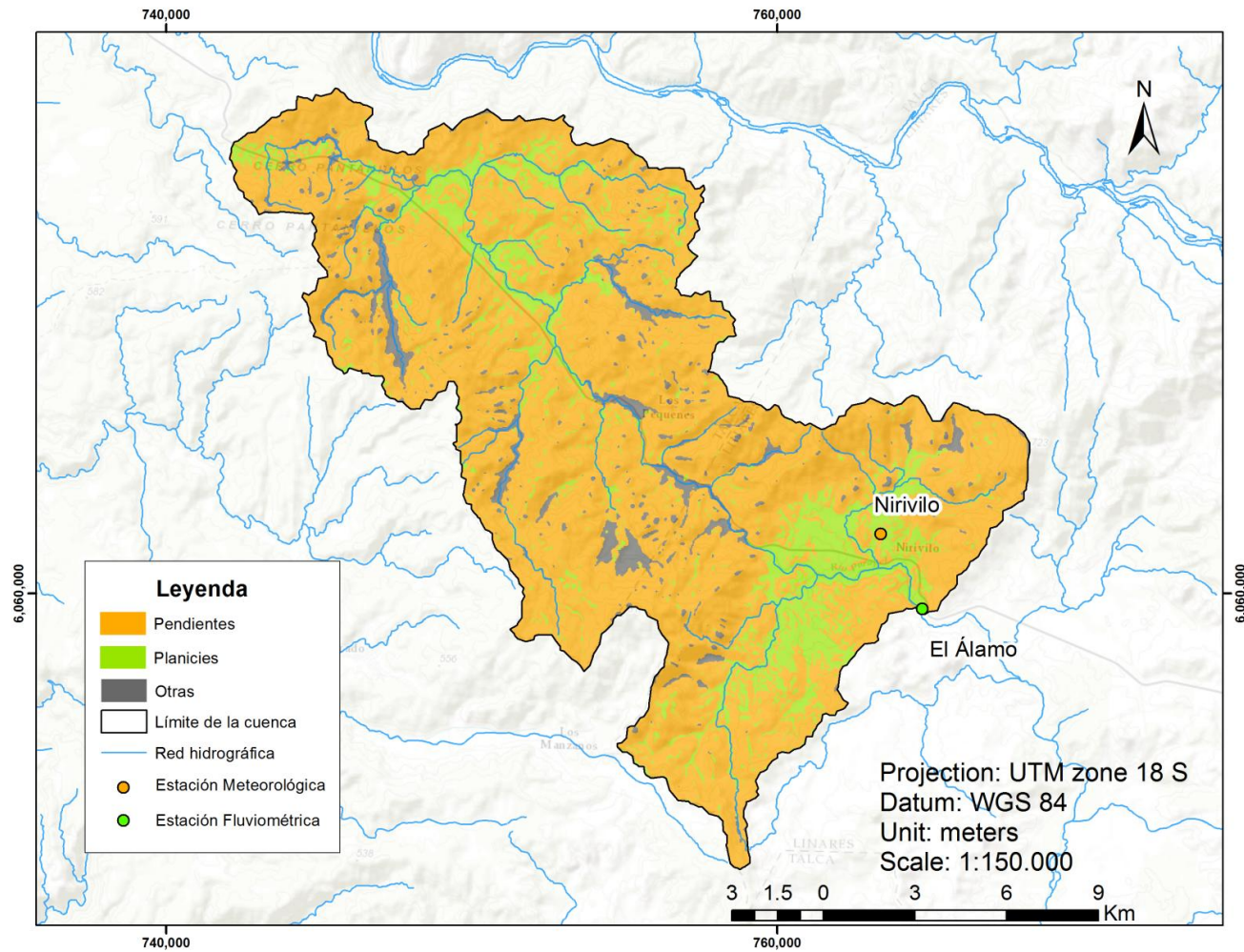
Anexo 5.d. Composición general del paisaje en el periodo 2000-2014 en la cuenca de Purapel (expresado en porcentaje de la superficie total de la cuenca)

Clase	1985-86	2000-01	2001-02	2004-05	2005-06	2006-07	2008-09	2010-11	2013-14	Media	Desv. Estándar	Coef. De Variación
Sin Clasificar	0%	1%	0%	1%	0%	1%	0%	0%	1%	1%	1%	102%
Agrícola-Praderas (AP)	2%	8%	4%	3%	4%	3%	4%	6%	4%	4%	1%	33%
Bosque Nativo (B)	17%	6%	8%	7%	6%	5%	8%	7%	8%	7%	1%	16%
Matorral (M)	9%	60%	50%	46%	45%	45%	40%	43%	31%	45%	8%	18%
Plantaciones Industriales (P)	47%	20%	31%	35%	40%	38%	39%	33%	46%	35%	8%	22%
Suelo Desnudo (SD)	26%	5%	6%	8%	4%	7%	8%	11%	10%	7%	2%	31%
Urbano (U)	0%	0%	0%	1%	1%	1%	0%	0%	1%	1%	0%	42%

Anexo 6.a Geformas del paisaje en la cuenca de Cauquenes



Anexo 6.b. Geoformas del paisaje en la cuenca de Purapel



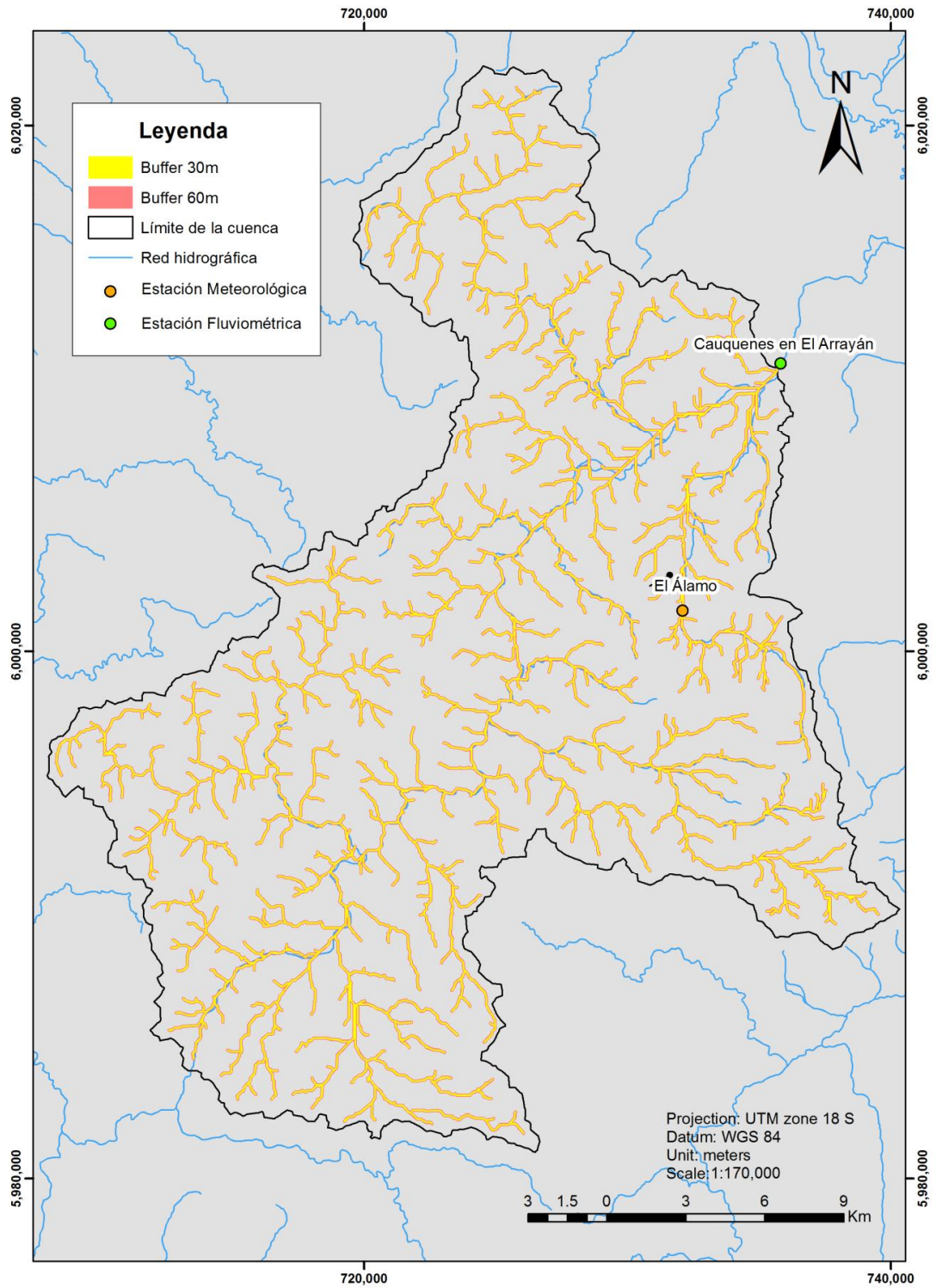
Anexo 6.c. Superficie de clase de cobertura de suelo según ubicación en el paisaje (geoformas del paisaje) en la cuenca de Cauquenes en periodo 2000-2014 (expresado en porcentaje de la superficie total de la cuenca)

Año	Geoforma								
	B_cajon	B_plano	B_pend	M_cajon	M_plano	M_pend	P_cajon	P_plano	P_pend
2000-01	0,81%	0,27%	5,82%	0,96%	10,09%	21,39%	1,37%	3,36%	20,52%
2001-02	0,86%	0,36%	6,27%	1,35%	11,91%	23,09%	1,67%	5,12%	23,16%
2004-05	0,79%	0,31%	4,31%	0,87%	11,52%	22,24%	1,94%	5,54%	24,85%
2005-06	0,59%	0,30%	3,70%	1,09%	11,53%	21,98%	2,06%	6,24%	25,58%
2006-07	0,75%	0,43%	4,61%	1,41%	13,49%	25,15%	1,52%	5,58%	22,15%
2008-09	0,69%	0,41%	5,16%	1,05%	11,17%	22,53%	1,41%	5,45%	22,08%
2010-11	0,63%	0,31%	3,94%	1,16%	13,21%	20,79%	1,57%	8,23%	30,15%
2013-14	0,76%	0,33%	5,27%	1,02%	10,20%	17,31%	1,40%	7,63%	25,94%
Media	0,74%	0,34%	4,89%	1,11%	11,64%	21,81%	1,62%	5,89%	24,30%
SD	0,09%	0,06%	0,90%	0,19%	1,24%	2,24%	0,26%	1,51%	3,02%
CV	12,5%	16,3%	18,5%	16,7%	10,6%	10,3%	15,9%	25,7%	12,4%

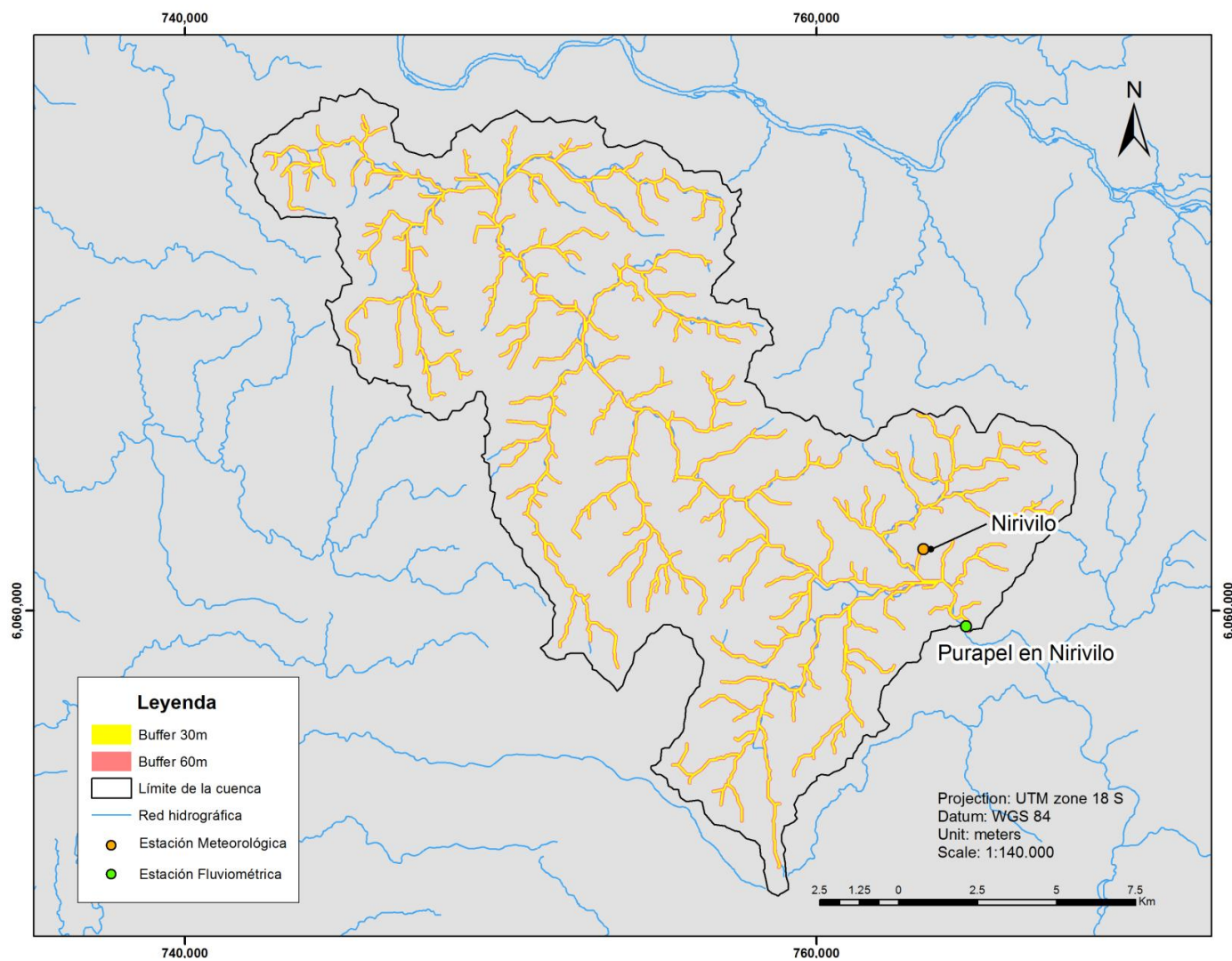
Anexo 6.d. Superficie de clase de cobertura de suelo según ubicación en el paisaje (geoformas del paisaje) en la cuenca de Purapel en periodo 2000-2014 (expresado en porcentaje de la superficie total de la cuenca)

Año	Geoformas								
	B_cajon	B_plano	B_pend	M_cajon	M_plano	M_pend	P_cajon	P_plano	P_pend
2000-01	0,10%	0,26%	5,84%	0,74%	4,17%	14,50%	1,56%	4,42%	51,90%
2001-02	0,12%	0,23%	7,70%	1,34%	6,52%	22,52%	1,38%	3,52%	43,98%
2004-05	0,20%	0,25%	5,85%	1,43%	7,53%	25,43%	1,24%	3,07%	40,25%
2005-06	0,13%	0,22%	5,75%	1,44%	8,52%	28,93%	1,14%	3,12%	39,79%
2006-07	0,12%	0,19%	4,70%	1,55%	7,49%	28,48%	1,16%	3,20%	39,52%
2008-09	0,28%	0,37%	7,37%	1,48%	6,98%	29,95%	0,96%	3,00%	34,83%
2010-11	0,24%	0,33%	5,87%	1,33%	6,96%	24,12%	0,82%	3,52%	37,62%
2013-14	0,21%	0,32%	6,97%	1,67%	6,07%	36,92%	0,57%	2,28%	27,11%
Media	0,17%	0,27%	6,26%	1,37%	6,78%	26,36%	1,10%	3,27%	39,37%
SD	0,07%	0,06%	1,00%	0,28%	1,28%	6,51%	0,31%	0,61%	7,10%
CV	37,4%	23,2%	16,0%	20,3%	18,9%	24,7%	28,5%	18,5%	18,0%

Anexo 7.a. Buffers de vegetación asociado a cauces en la cuenca de Cauquenes



Anexo 7.b. Buffers de vegetación asociado a cauces en la cuenca de Purapel



Anexo 7.c. Superficie por cobertura de suelo en fajas de 30m asociadas a cursos de agua en la cuenca de Cauquenes (expresado en ha)

Temporada	AP	B	M	P	SD
2000-01	1203,4	565,5	1297,8	695,4	505,1
2001-02	468,4	516,5	1754,3	977,1	593,4
2004-05	1007,2	520,3	1345,1	1085,3	288,9
2005-06	718,1	398,4	1512,4	1283,9	357,3
2006-07	701,0	552,2	1803,8	933,5	258,7
2008-09	1018,8	543,0	1413,7	902,8	344,0
2010-11	1001,2	488,3	1415,4	1230,5	109,9
2013-14	886,7	529,2	1262,5	1109,9	400,3
Media	875,6	514,2	1475,6	1027,3	357,2
SD	233,7	52,4	202,9	190,6	148,9
CV	27%	10%	14%	19%	42%

Anexo 7.d. Superficie por cobertura de suelo en fajas de 30m asociadas a cursos de agua en la cuenca de Cauquenes (porcentaje de la superficie total de la faja⁴)

Temporada	AP	B	M	P	SD
2000-01	27,8%	13,1%	30,0%	16,1%	11,7%
2001-02	10,8%	11,9%	40,6%	22,6%	13,7%
2004-05	23,3%	12,0%	31,1%	25,1%	6,7%
2005-06	16,6%	9,2%	35,0%	29,7%	8,3%
2006-07	16,2%	12,8%	41,7%	21,6%	6,0%
2008-09	23,6%	12,6%	32,7%	20,9%	8,0%
2010-11	23,1%	11,3%	32,7%	28,5%	2,5%
2013-14	20,5%	12,2%	29,2%	25,7%	9,3%
Media	20,2%	11,9%	34,1%	23,8%	8,3%
SD	5,4%	1,2%	4,7%	4,4%	3,4%
CV	27%	10%	14%	19%	42%

⁴ Superficie de faja a 30m desde cauces: 4.325 ha

Anexo 7.e. Superficie por cobertura de suelo en fajas de 30m asociadas a cursos de agua en la cuenca de Purapel (expresado en ha)

Temporada	AP	B	M	P	SD
2000-01	1002,3	225,1	621,7	1699,3	217,8
2001-02	446,8	184,3	1291,8	1543,6	331,7
2004-05	424,3	279,9	1608,7	1286,9	149,3
2005-06	557,5	183,3	1621,5	1341,9	74,7
2006-07	423,7	184,9	1610,0	1371,4	160,2
2008-09	535,4	377,4	1585,0	1122,8	165,5
2010-11	725,6	355,0	1378,9	1158,9	163,6
2013-14	620,6	358,1	1533,5	852,3	332,9
Media	592,0	268,5	1406,4	1297,1	199,4
SD	196,0	85,1	339,4	261,2	90,8
CV	33%	32%	24%	20%	46%

Anexo 7.f. Superficie por cobertura de suelo en fajas de 30m asociadas a cursos de agua en la cuenca de Purapel (pocentaje de la superficie total de la faja⁵)

Temporada	AP	B	M	P	SD
2000-01	26,3%	5,9%	16,3%	44,7%	5,7%
2001-02	11,7%	4,8%	34,0%	40,6%	8,7%
2004-05	11,2%	7,4%	42,3%	33,8%	3,9%
2005-06	14,7%	4,8%	42,6%	35,3%	2,0%
2006-07	11,1%	4,9%	42,3%	36,1%	4,2%
2008-09	14,1%	9,9%	41,7%	29,5%	4,4%
2010-11	19,1%	9,3%	36,2%	30,5%	4,3%
2013-14	16,3%	9,4%	40,3%	22,4%	8,8%
Media	15,6%	7,1%	37,0%	34,1%	5,2%
SD	5,2%	2,2%	8,9%	6,9%	2,4%
CV	33%	32%	24%	20%	46%

⁵ Superficie de faja de 60m en torno a cauces: 3.804 ha

Anexo 8.a. Mediana del índice Topographic Wetness Index (TWI) por clase de cobertura dentro del paisaje en la cuenca de Cauquenes, en el periodo 2000-2014.

Año	TWI_B	TWI_M	TWI_P	TWI_SD
2000-01	9,45	9,96	9,48	10,09
2001-02	9,42	10,02	9,58	10,20
2004-05	9,54	9,96	9,59	10,09
2005-06	9,49	9,98	9,63	10,08
2006-07	9,53	9,98	9,63	10,08
2008-09	9,86	9,75	9,23	9,29
2010-11	9,54	10,00	9,70	9,86
2013-14	9,49	10,02	9,72	10,09
Media	9,51	9,98	9,61	10,09
SD	0,13	0,09	0,15	0,29
CV	1,4%	0,9%	1,6%	2,9%

Anexo 8.b. Mediana del índice Topographic Wetness Index (TWI) por clase de cobertura dentro del paisaje en la cuenca de Cauquenes, en el periodo 2000-2014.

Año	TWI_B	TWI_M	TWI_P	TWI_SD
2000-01	9,56	9,75	9,47	10,09
2001-02	9,44	9,75	9,48	10,20
2004-05	9,61	9,75	9,47	9,64
2005-06	9,50	9,71	9,49	9,80
2006-07	9,54	9,69	9,50	9,86
2008-09	9,58	9,63	9,49	9,86
2010-11	9,62	9,75	9,48	9,51
2013-14	9,56	9,57	9,49	9,98
Media	9,55	9,70	9,48	9,87
SD	0,06	0,06	0,01	0,23
CV	0,6%	0,7%	0,1%	2,3%

Anexo 9. Coeficientes de Escorrentía anual para las cuencas de Cauquenes y Purapel en el periodo 2000-2014.

A continuación, se presentan los valores de los coeficientes de escorrentía estimados para las cuencas de Cauquenes y Purapel a partir de las estaciones fluviométricas y meteorológicas señaladas en el Cuadro 2. El año se dividió de forma cuatrimestral de acuerdo al año hidrológico (abril a marzo) de la siguiente manera: otoño (abril-mayo-junio-julio), primavera (agosto-septiembre-octubre-noviembre), verano (diciembre-enero-febrero-marzo). En rojo se destacan los años identificados como “outliers” o valores anómalos, y que no fueron considerados para los análisis estadísticos.

Anexo 9a. Coeficientes de Escorrentía anual y estacional para la cuenca de Cauquenes en el periodo 2001-01 a 2013-14

Temporada	Estación			
	Anual	Otoño	Primavera	Verano
2000-01	0,63	0,66	0,61	0,17
2001-02	0,56	0,51	1,08	0,03
2002-03	0,49	0,41	0,58	0,38
2003-04	0,21	0,25	0,20	0,08
2004-05	0,46	0,41	0,60	0,18
2005-06	0,80	0,71	1,14	0,34
2006-07	0,62	0,65	0,72	0,08
2007-08	0,31	0,13	0,74	0,63
2008-09	0,84	0,79	1,00	8,49
2009-10	0,46	0,27	0,77	0,34
2010-11	0,27	0,18	0,58	0,07
2011-12	0,33	0,21	0,65	0,06
2012-13	0,24	0,25	0,27	0,05
2013-14	0,35	0,29	0,61	0,12
Media	0,47	0,41	0,68	0,79
DS	0,19	0,21	0,26	2,14
CV	40%	51%	38%	271%

Anexo 9b. Coeficientes de Escorrentía anual y estacional para la cuenca de Purapel en el periodo 20001-01 a 2013-14

Temporada	Estación			
	Anual	Otoño	Primavera	Verano
2000-01	0,58	0,55	0,69	0,12
2001-02	0,54	0,49	0,94	0,08
2002-03	0,45	0,35	0,50	3,07
2003-04	0,24	0,20	0,32	0,19
2004-05	0,28	0,28	0,30	0,22
2005-06	0,68	0,46	1,08	2,90
2006-07	0,50	0,55	0,48	0,22
2007-08	0,31	0,22	0,51	0,14
2008-09	0,66	0,62	0,82	7,27
2009-10	0,71	0,40	0,99	0,80
2010-11	0,42	0,35	0,76	0,14
2011-12	0,40	0,29	0,66	0,16
2012-13	0,44	0,58	0,40	0,10
2013-14	0,43	0,42	0,48	0,37
Media	0,47	0,41	0,64	1,13
DS	0,14	0,13	0,24	1,96
CV	30%	32%	38%	173%

Anexo 10. Correlaciones entre variables del paisaje y coeficientes de escorrentía a escala anual y estacional en el periodo 2000-2014

A continuación, se presentan todas las correlaciones estadísticamente significativas observadas en el periodo 2000-2014 en las cuencas de Cauquenes y Purapel entre variables de composición y configuración del paisaje y los coeficientes de escorrentía a escala anual y estacional.

Las correlaciones positivas se enlistan en la columna marcada con un signo positivo (+) y las negativas, uno negativo (-). Las estaciones en las que no se registraron correlaciones estadísticamente significativas se representan con la sigla “s/c”.

Cuenca	Anual		Otoño		Primavera		Verano	
	+	-	+	-	+	-	+	-
Cauquenes	FRAC_MD	Plantaciones en Pendientes	FRAC_MD	Plantaciones en Pendientes	FRAC_MD	s/c	SHAPE_MD FRAC_MD	s/c
Purapel	s/c	s/c	s/c	s/c	PAFRAC	s/c	M_30 M_60 SHAPE_SD SHAPE_CV	PROX_CV PAFRAC